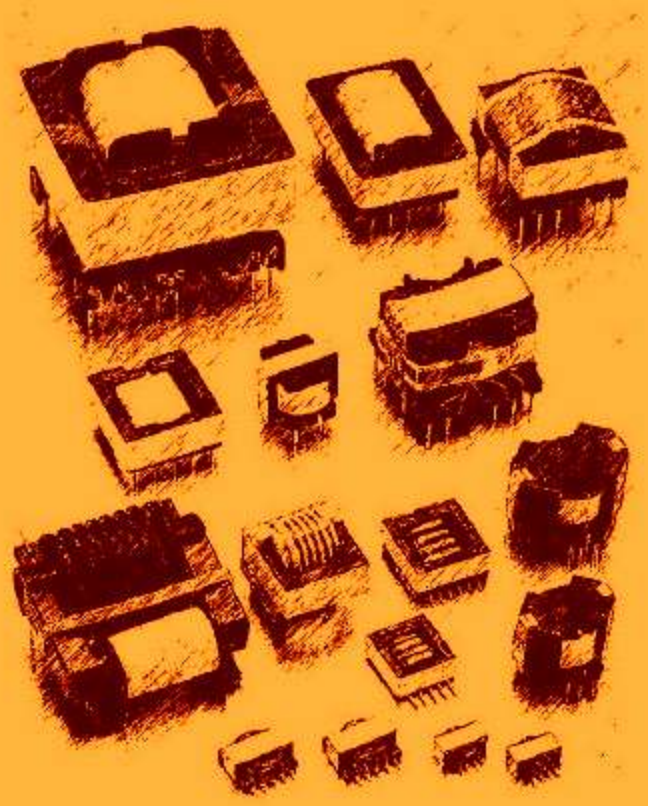
Vittorio Carboni

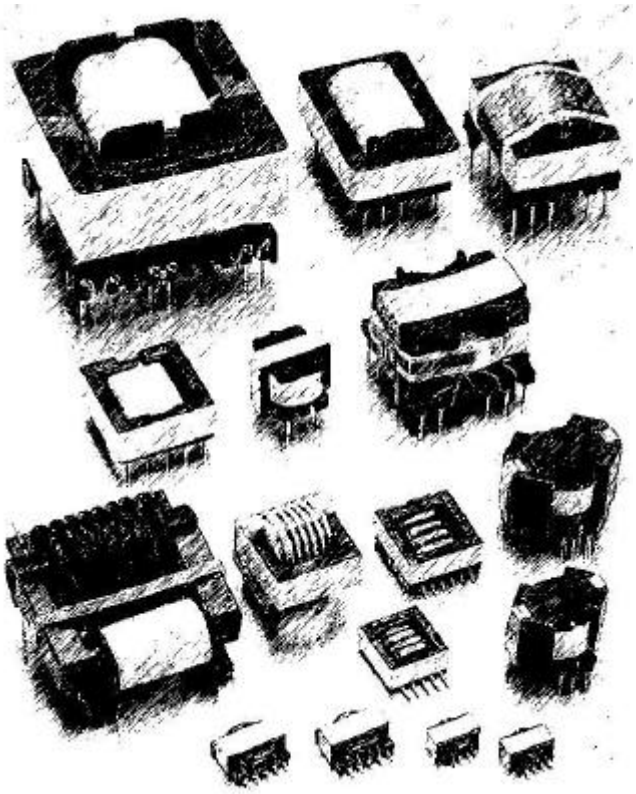
# Guida al progetto dei trasformatori per alimentatori Flyback e Forward



Università di Ancona
Dipartimento di Elettronica e Automatica
AA 1999/2000

Vittorio Carboni

# Guida al progetto dei trasformatori per alimentatori Flyback e Forward



Università di Ancona
Dipartimento di Elettronica e Automatica
AA 1999/2000

**1. ALIMENTATORE A COMMUTAZIONE: SCELTA DELLA FERRITE ..... 3**

**2. CALCOLO SEMPLIFICATO DEL TRASFORMATORE ..... 7**

**3. TRASFORMATORE PER CONVERTITORE *FLYBACK* : ESEMPIO DI CALCOLO. ..... 15**

**4. TRASFORMATORE PER CONVERTITORE *FORWARD* : ESEMPIO DI CALCOLO. ..... 22**

**5. AVVOLGIMENTI: SUPPORTI, ISOLAMENTI E FILI. ..... 27**

SU COSA ..... 27
COME ..... 28
CON COSA ..... 30
EFFETTO PELLE E DI PROSSIMITÀ. ..... 31

**6. COMPLETIAMO IL PROGETTO DEL TRASFORMATORE PER *FLYBACK* ..... 34**

PRIMARIO. ..... 34
SECONDARIO. ..... 35
CONCLUSIONI ..... 36

**7. APPENDICE ..... 37**

**8. BIBLIOGRAFIA ..... 41**

Figura 1 - Esempio di assemblaggio di un kit: supporto, coppia di ferriti ETD ed una coppia di mollette di fissaggio... 3
Figura 2 - Pv = f(f) materiale N67 @ T=20 e 100°C. ..... 9
Figura 3 - Parametri del supporto per ETD49. ..... 18
Figura 4 - *Coil former* per montaggio orizzontale. ..... 27
Figura 5 - Rappresentazione schematica della sezione di un trasformatore con particolare della *creepage distance* ..... 28
Figura 6 - Esempio di schermo elettrostatico tra primario e secondario. ..... 28
Figura 7 - Sezione di trasformatore: primario su due strati con secondario interposto. ..... 29
Figura 8 - Aumento percentuale della resistenza del filo in funzione del diametro e della frequenza. ..... 32
Figura 9 - Particolare della sezione del supporto per ETD49 ..... 34
Figura 10 - Particolare della sezione del supporto per ETD49, con la possibile stratificazione . ..... 36
Figura 11 - Construtcion type - New England Electric Wire Co ..... 39

Tabella 1 - Alcuni parametri per le ferriti di tipo ETD ..... 4
Tabella 2 - Massimo incremento della temperatura ammesso per i diversi materiali ..... 5
Tabella 3 - Resistenza termica per diversi tipi e dimensioni di ferriti. ..... 5
Tabella 4 - Dimerse tipologie di conduttori smaltati per avvolgimenti della PIREMAG. ..... 30
Tabella 5 - Calibro massimo del conduttore pieno in rame, a diverse frequenze. ..... 33
Tabella 6 - Dimensioni massime consigliate del singolo conduttore in un filo Litz in funzione della frequenza ..... 37
Tabella 7 - Fili Litz consigliati per frequenze 10KHz-20KHz - New England Electric Wire Co. - ..... 37
Tabella 8 - Fili Litz consigliati per frequenze 20KHz-50KHz - New England Electric Wire Co. ..... 38
Tabella 9 - Fili Litz consigliati per frequenze 50KHz-100KHz - New England Electric Wire Co. ..... 38
Tabella 10 - Dimensioni nominali, minime e massime dei conduttori: isolamento singolo e doppio o rinforzato…..... 40

# 1. Alimentatore a commutazione: scelta della ferrite

Il primo passo nel progetto del trasformatore è la scelta della ferrite come forma fisica, tipo del materiale e dimensioni. È una scelta molto importante che caratterizza tutto il progetto in quanto tutti i calcoli successivi saranno basati su di essa. Un errore di valutazione può comportare accorgersi alla fine che, ad esempio, le dimensioni non sono adatte: ciò significa ripartire dall'inizio con notevole dispendio di tempo e risorse.

Le ferriti sono caratterizzate da perdite molto basse ad alte frequenze, esse sono realizzate con leghe di ossidi di ferro ed altri metalli come zinco e manganese. Il materiale viene polverizzato assieme ad ossidi isolanti e quindi modellato con tecniche tipiche della ceramica. Ciò consente di realizzare ferriti con grande varietà nelle forme e nelle dimensioni e con tolleranze nelle caratteristiche magnetiche e meccaniche molto ristrette. Esse, inoltre, possono essere lavorate con precisione dopo l'operazione della cottura.

Le ferriti tipicamente hanno una densità del flusso di saturazione compreso tra 3 e 5 kGauss, inoltre la presenza di ossidi ne aumenta la resistività specifica a livelli molto alti permettendo così di ridurre le perdite per correnti parassite. Le forme disponibili includono barrette, toroidi, nuclei EI EE ed UI. La temperatura di Curie $T_C$, ossia la temperatura alla quale il materiale perde ogni proprietà ferromagnetica, è compresa tra i 100 e i 300°C, a secondo del tipo di materiale; il fenomeno è reversibile, riducendo la temperatura al di sotto di $T_C$ il materiale riacquista le sue proprietà

Per trasformatori di bassa-media potenza la serie **E** è la scelta migliore**.** Come la sigla lascia intuire, il nucleo magnetico è composto da due elementi a forma di **E**. I due pezzi formano il circuito magnetico, vengono infilati nel supporto degli avvolgimenti e bloccati in sede con delle mollette e/o incollate con Araldite od altri collanti epossidici. Le tre superfici di contatto dei seminuclei sono lavorate in modo da ridurre le rugosità e quindi contenere a dimensioni trascurabili il traferro (*gap*) non intenzionale. In taluni casi il traferro è voluto, ciò può essere ottenuto realizzando la colonna centrale del seminucleo più corta di quelle esterne.

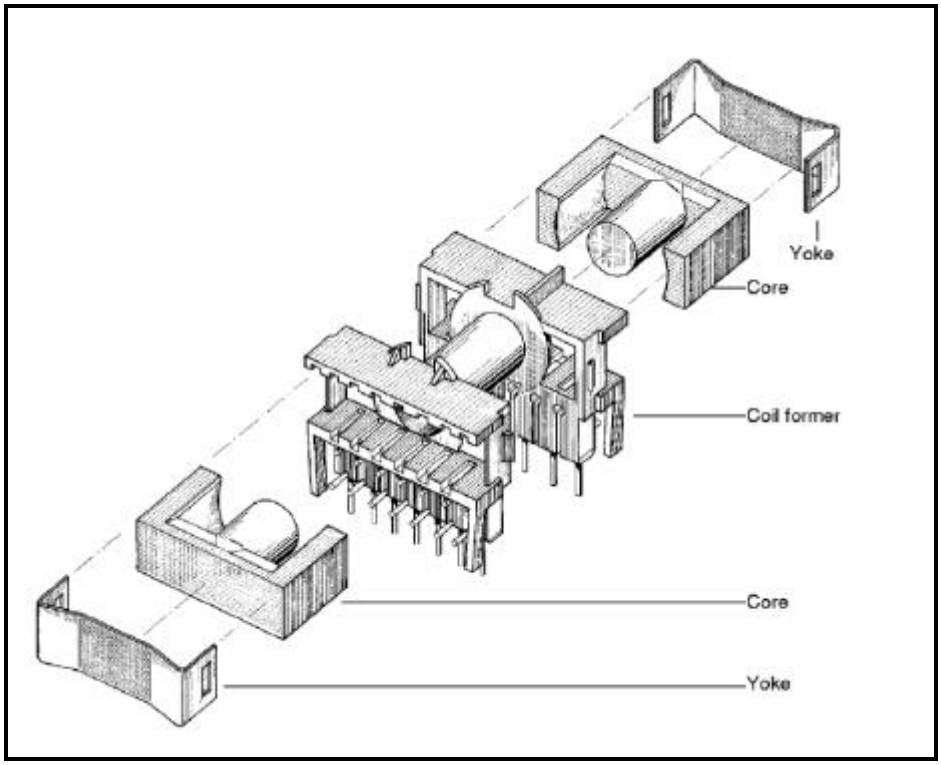



**Figura 1 - Esempio di assemblaggio di un kit composto dal supporto per gli avvolgimenti, una coppia di ferriti del tipo ETD ed una coppia di mollette di fissaggio. (Ferrites and Accessories, Siemens Matsushita Components)**

È possibile scegliere da catalogo seminuclei con traferro (*Gap*) calibrato. Per la ferrite tipo ETD49, ad esempio, possiamo avere 4 valori di traferro: 0,20±0,02mm, 0,50±0,05mm, 1,00±0,05, 2,00±0,05mm.

Accoppiando un seminucleo con traferro con un altro senza, oppure anch'esso con traferro, anche di valore diverso, si riescono ad ottenere numerose combinazioni.

Le ferriti della serie **E** ed **ETD** sono largamente usate, pertanto risultano di facile reperibilità Il catalogo Siemens Matsushita indica che i materiali a disposizione per la serie **E** sono diversi e codificati con le sigle **N27**, **N67**, **N87**, **N49**, **N30**, **T37**. La scelta del materiale da usare è correlata con la frequenza di commutazione: il tipo **N27** è adatto per applicazioni di potenza in un banda di frequenza di commutazione sino a 100KHz, **N67** è idoneo per analoghe applicazione ma la gamma di frequenza è compresa tra 100KHz ed i 300KHz. La tabella 1 indica le possibili applicazioni per i diversi materiali. La serie **E** classica ha la colonna centrale quadrata, altre famiglie della stessa serie sono disponibili per applicazioni particolari ad esempio le più note:

- **ETD** acronimo di Economic Transformer Design, con sezione circolare della colonna centrale
- **EFD** acronimo di Economic Flat transformer Design per applicazioni con ingombri verticali contenuti.

| | | | | | Power capacities | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Push-pull converter | | Single-ended converter | | Flyback converter | |
| Core shape | Material | Volume $mm^3$ V | $f_{typ}$ KHz | $f_{cutoff}$ KHz | $P_{trans}$ ($f_{typ}$) W | $P_{trans}$ ($f_{cutoff}$) W | $P_{trans}$ ($f_{typ}$) W | $P_{trans}$ ($f_{cutoff}$) W | $P_{trans}$ ($f_{typ}$) W | $P_{trans}$ ($f_{cutoff}$) W |
| ETD29 | N59 | 32100 | 750 | 1500 | 428 | 614 | 304 | 436 | 261 | 375 |
| | N49 | | 500 | 1000 | 209 | 300 | 148 | 213 | 127 | 183 |
| | N62 | | 25 | 150 | 103 | 151 | 52 | 55 | 45 | 47 |
| | N27 | | 25 | 100 | 51 | 94 | 33 | 38 | 28 | 32 |
| | N67 | | 100 | 300 | 161 | 286 | 115 | 189 | 98 | 163 |
| | N87 | | 100 | 500 | 225 | 522 | 160 | 237 | 137 | 204 |
| ETD34 | N59 | 60200 | 750 | 1500 | 676 | 970 | 480 | 689 | 412 | 592 |
| | N49 | | 500 | 1000 | 330 | 473 | 234 | 336 | 201 | 289 |
| | N62 | | 25 | 150 | 162 | 244 | 84 | 89 | 72 | 77 |
| | N27 | | 25 | 100 | 80 | 151 | 53 | 61 | 45 | 52 |
| | N67 | | 100 | 300 | 255 | 452 | 181 | 303 | 155 | 260 |
| | N87 | | 100 | 500 | 356 | 824 | 253 | 383 | 217 | 329 |
| ETD39 | N59 | 82100 | 750 | 1500 | 1016 | 1458 | 721 | 1035 | 620 | 889 |
| | N49 | | 500 | 1000 | 495 | 711 | 352 | 505 | 302 | 434 |
| | N62 | | 25 | 150 | 244 | 409 | 139 | 152 | 120 | 130 |
| | N27 | | 25 | 100 | 120 | 241 | 84 | 102 | 72 | 88 |
| | N67 | | 100 | 300 | 383 | 680 | 272 | 478 | 234 | 410 |
| | N87 | | 100 | 500 | 535 | 1239 | 380 | 639 | 326 | 549 |
| ETD44 | N62 | 109000 | 25 | 150 | 405 | 703 | 238 | 261 | 205 | 225 |
| | N27 | | 25 | 100 | 200 | 406 | 141 | 176 | 121 | 151 |
| | N67 | | 100 | 300 | 636 | 1129 | 452 | 801 | 388 | 688 |
| | N87 | | 100 | 500 | 889 | 2059 | 631 | 1097 | 542 | 942 |
| ETD49 | N62 | 139000 | 25 | 150 | 629 | 1081 | 367 | 401 | 315 | 344 |
| | N27 | | 25 | 100 | 310 | 629 | 218 | 270 | 188 | 232 |
| | N67 | | 100 | 300 | 989 | 1754 | 702 | 1241 | 603 | 1066 |
| | N87 | | 100 | 500 | 1380 | 3197 | 980 | 1686 | 842 | 1448 |
| ETD54 | N62 | 293000 | 25 | 150 | 943 | 1700 | 573 | 635 | 492 | 545 |
| | N27 | | 25 | 100 | 411 | 845 | 292 | 376 | 251 | 323 |
| | N67 | | 100 | 300 | 1482 | 2629 | 1052 | 1871 | 904 | 1607 |
| | N87 | | 100 | 500 | 2069 | 4791 | 1469 | 2644 | 1262 | 2271 |
| ETD59 | N62 | 412000 | 25 | 150 | 1576 | 2807 | 948 | 1046 | 814 | 899 |
| | N27 | | 25 | 100 | 777 | 1595 | 552 | 703 | 474 | 604 |
| | N67 | | 100 | 300 | 2478 | 4395 | 1759 | 3127 | 1511 | 2687 |
| | N87 | | 100 | 500 | 3459 | 8010 | 2456 | 4370 | 2110 | 3754 |

**Tabella 1 - Alcuni parametri per le ferriti di tipo ETD (Ferrites and Accessories, Siemens Matsushita Components).**

| Material | $\Delta T_{max}$ °C | $f_{typ}$ KHz | $f_{cutoff}$ KHz |
|---|---|---|---|
| N59 | 30 | 750 | 1500 |
| N49 | 20 | 500 | 100 |
| N62 | 40 | 25 | 150 |
| N27 | 30 | 25 | 100 |
| N67 | 40 | 100 | 300 |
| N87 | 50 | 100 | 500 |
| N72 | 40 | 25 | 150 |
| N41 | 30 | 25 | 100 |
| N61 | 30 | 25 | 150 |

**Tabella 2 - Massimo incremento della temperatura ammesso per i diversi materiali (Ferrites and Accessories, Siemens Matsushita Components).**

| Core type | $R_{th}$ (°C/W) | Core type | $R_{th}$ (°C/W) | Core type | $R_{th}$ (°C/W) |
|---|---|---|---|---|---|
| E20/6 | 50 | ETD29 | 28 | PM50/39 | 15 |
| E25 | 40 | ETD34 | 20 | PM62/49 | 12 |
| E30/7 | 23 | ETD39 | 16 | PM74/59 | 9.5 |
| E32 | 22 | ETD44 | 11 | PM87/70 | 8 |
| E40 | 20 | ETD49 | 8 | PM114/93 | 6 |
| E42/15 | 19 | ETD54 | 6 | | |
| E42/20 | 15 | ETD59 | 4 | U11 | 46 |
| E47 | 13 | | | U15 | 35 |
| E55/21 | 11 | ER42 | 12 | U17 | 30 |
| E55/25 | 8 | ER49 | 9 | U20 | 24 |
| E65/27 | 6 | ER54 | 11 | U21 | 22 |
| | | | | U25 | 15 |
| EC35 | 18 | RM4 | 120 | U26 | 13 |
| EC41 | 15 | RM5 | 100 | U30 | 4 |
| EC52 | 11 | RM6 | 80 | U93/20 | 1.7 |
| EC70 | 7 | RM7 | 68 | U93/30 | 1.2 |
| | | RM8 | 57 | UI93 | 5 |
| EFD10 | 120 | RM10 | 40 | UU93 | 4 |
| EFD15 | 75 | RM12 | 25 | | |
| EFD20 | 45 | RM14 | 18 | | |
| EFD25 | 30 | | | | |
| EFD30 | 25 | | | | |

**Tabella 3 - Resistenza termica per diversi tipi e dimensioni di ferriti (Ferrites and Accessories, Siemens Matsushita Components).**

I parametri più importanti per una corretta scelta della ferrite sono:

1. Potenza massima ($P_{trans}$)
2. Tipologia del convertitore (Forward, Flyback, Push-Pull )
3. Frequenza di commutazione e massima sovratemperatura ammessa
4. Volume massimo

Per effettuare la scelta è bene considerare che il costruttore, di norma, indica sempre dei valori ***limite***, dunque se non è stringente il problema dei costi, è buona regola scegliere il tipo immediatamente superiore a quello che da tabella eroga la potenza richiesta. Si eviterà poi in fase di avvolgimento scoprire che il numero di spire calcolato, con il filo di sezione calcolata non entri per carenza di spazio nella gola del supporto degli avvolgimenti. Questa precauzione è tanto più consigliata se il trasformatore deve essere avvolto nel rispetto delle norme di sicurezza (distanze minime tra i diversi strati degli avvolgimenti, uso di fili con doppio isolamento ecc.).

La sezione che segue fornisce un esempio di calcolo di un trasformatore a commutazione [1]; l'approccio a questo tipo di calcolo è in molti passaggi forzatamente empirico, in molti altri semplificato. D'altronde una trattazione completamente teorica, oltre che esulare dalle finalità di queste pagine, comporterebbe un dispendio di risorse notevole senza i benefici di migliori risultati.

Esistono programmi per computer che in modo interattivo consentono di progettare il trasformatore. In particolare un programma [6] sviluppato e commercializzato dalla Intusoft consente di sviluppare progetti di trasformatori non solo a commutazione, valutando le sovratemperature, le capacità tra gli avvolgimenti, l'induttanza di dispersione in funzione della disposizione e/o parzializzazione degli avvolgimenti e il modello del trasformatore per le simulazioni tramite SPICE, ma il costo di tale programma è notevole. A titolo di esempio, per un confronto con il flusso di progetto che vedremo, viene riportato in forma semplificata l'algoritmo usato dal programma citato per la scelta della ferrite:

```
While the design temperature rise is higher than specified
    If the core is not locked
        If it's the first pass, pick the smallest core based on low frequency copper loss
        Otherwise pick the next largest core in the family

        Select the current density and flux density
        Do until exit conditions (listed below)
            Calculate the turns for each winding
            Calculate the area available for each winding
            Do until the temperature is stable

                For each winding
                    For each strand number
                        Calculate the build and resistance
                        Estimate AC losses
                        Save data for lowest loss configuration
                    Select the best strand count
                    Calculate the build parameters
                Calculate power loss

            Break out of this loop after 15 iterations (exit conditions)
            Adjust the current density to make the winding fill equal to the specification
            Adjust the flux density to make the core/copper loss ratio optimum
            Adjust the core/copper loss ratio for minimum total loss
            Evaluate special break conditions
        Do until exit condition
            For each winding
                Make wire smaller if power loss decreases
            Break out after 3 passes
            Adjust area per winding
            Readjust strand and build calculations
        If no more cores, break out of the loop
```

# 2. Calcolo semplificato del trasformatore

Ciò che segue è un esempio semplificato di progetto del trasformatore di alimentatori a commutazione sia per la tipologia *Flyback* sia per il *Forward*. Le procedure e le formule sono tratte dalle *Application Note* contenute in *Ferrites and Accessories* edito dalla Siemens Matsushita Components AG 1994. Tutta la procedura di calcolo segue questa linea guida:

1. **Nota la tipologia dell'alimentatore, la richiesta di potenza in uscita e la frequenza di commutazione si sceglie la ferrite idonea (**ad esempio consultando la tabella 1**).**

2. **Individuazione della massima sovratemperatura DT ammessa per il tipo di materiale scelto (**vedi Tabella 2**).**

3. **Determinazione della resistenza termica complessiva del trasformatore (**vedi tabella 3 o tramite la (0.1) **).**

$$R_{th} = \left(3 + \frac{650}{A}\right) \qquad (0.1)$$

dove:
$R_{th}$ : resistenza termica in **°C/W**
A : superficie del trasformatore in **cm²**

4. **Calcolo della potenza persa massima dissipabile dal trasformatore nelle sue componenti, rame e ferrite, affinché la sovratemperatura non superi la soglia individuata al punto 2.**

$$P_{Vtot} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \qquad (0.2)$$

dove:
$P_{Vtot}$ : Potenza totale dissipabile dal trasformatore in **W**
$\Delta T$ : sovratemperatura massima consentita in **°C**
$R_{th}$ : resistenza termica in **°C/W**

**5. Individuazione del valore minimo di tensione continua applicata in ingresso.**

$$V_{i\min} = \sqrt{\left(V_{Ri\min}\right)^2 - \frac{P_i}{C_i \cdot f_R}} \qquad (0.3)$$

dove:

$V_{imin}$ : Tensione di ingresso minima in **V**(dc)
$V_{Rimin}$ : Tensione di rete minima in **V**(dc)
$P_i$ : Potenza massima assorbita in ingresso in **W**
$C_i$ : Capacità di filtro in ingresso in **F**
$f_R$ : Frequenza di rete in **Hz**

**6. Distribuzione della potenza persa.**

Si stimano le perdite calcolate con la (0.2) equamente distribuita tra la ferrite ed il rame

$$P_{Vtot} = P_{VFe} + P_{VCu} \qquad (0.4)$$

$$P_{VFe} = P_{VCu} = \frac{P_{Vtot}}{2} \qquad (0.5)$$

dove:

$P_{Vtot}$ : Potenza persa totale dissipabile dal trasformatore in **W**
$P_{Vfe}$ : Potenza persa nella ferrite in **W**
$P_{Vcu}$ : Potenza persa nel rame in **W**

**7. Calcolo della potenza persa specifica in volume per la ferrite scelta.**

I valori di potenza persa specifica indicati nel manuale sono riferiti a misure effettuate con forma d'onda sinusoidale e con ciclo di magnetizzazione completo (p.e. configurazione *push-pull*). Pertanto per determinare le perdite con onda quadra e configurazione *single-ended* è necessario utilizzare dei coefficienti corretivi ($K_{Form}$, $K_{hyst}$).

$$P_{Vmat} = \frac{P_{VFe}}{K_{Form} \cdot K_{hyst} \cdot v_{Fe}} \qquad (0.6)$$

dove:

$P_{Vmat}$ : Potenza persa specifica in volume in **KW/m$^3$**
$P_{Vfe}$ : Potenza persa nella ferrite in **KW**
$v_{Fe}$ : Volume della ferrite in **m$^3$**
$K_{Form}$ : Coefficiente di forma 0,8 per onda quadra 1 per onda sinusoidale
$K_{hyst}$ : Coefficiente di isteresi *single-ended* vs *push-pull* =0,33

### 8. Determinazione del flusso massimo ammesso $DB_{max}$ in funzione delle perdite nella ferrite.

Dai grafici riportati nel catalogo citato relativi alla potenza persa in funzione della frequenza si ricava il flusso massimo consentito. Il grafico che segue è un esempio relativo al materiale N67 Pv=f(B) per f=100KHz e T=100°C.

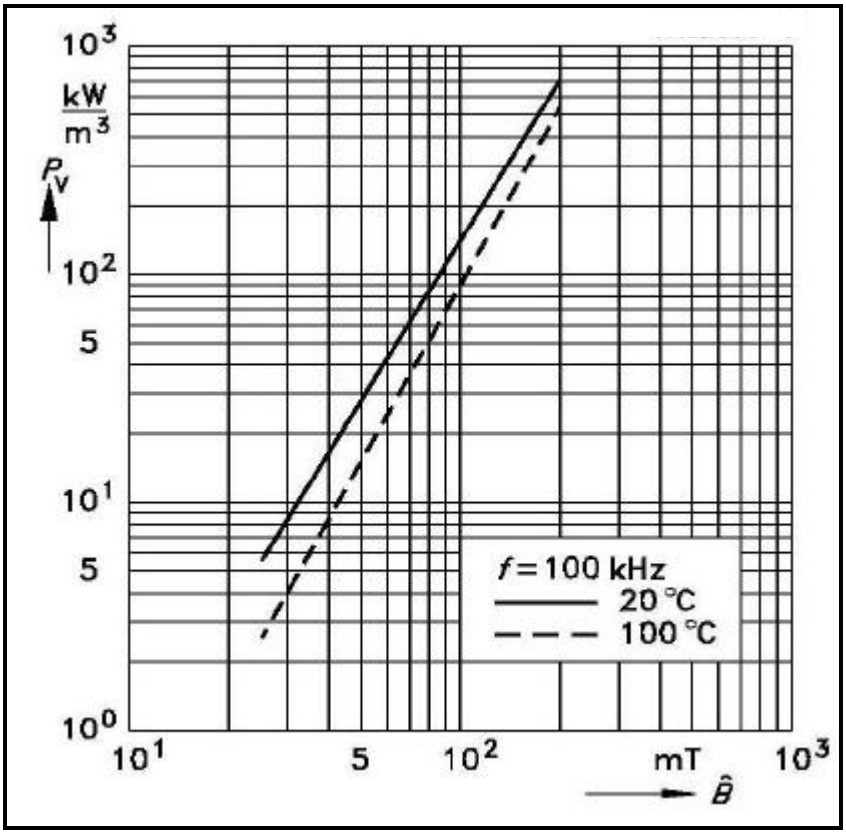



**Figura 2 - Pv = f(f) materiale N67 @ T=20 e 100°C.**

In alternativa, con buona approssimazione, possiamo usare la formula che segue per calcolarci il valore di induzione B massimo a 100°C per materiale N67 in funzione delle perdite espresse in $KW/m^3$ per frequenze di commutazione di 25;50,100,200KHz:

$$B = \frac{10^{\left(a + b \cdot \log P_{vmat} + c \cdot \log^2 P_{vmat}\right)}}{1000} \qquad (0.7)$$

dove:

B : Valore massimo di induzione permessa in **T**

$P_{Vmat}$ : Potenza persa specifica in volume in **$KW/m^3$**

| | | 25KHz | 50KHz | 100KHz | 200KHz |
|---|---|---|---|---|---|
| a | : | 1,65551 | 1,5315 | 1,31453 | 1,06514 |
| b | : | 0,31752 | 0,3151 | 0,2992 | 0,4334 |
| c | : | 0,01249 | 0.0095 | -0,01358 | -0,01514 |

## 9. Calcolo del numero di spire al primario.

$$t_{on\max} = \frac{1}{f} \cdot t_v \qquad (0.8)$$

dove:

$t_{onmax}$ : Periodo massimo di chiusura in **ms**
$t_v$ : *Duty Cycle*
f : Frequenza di commutazione in **MHz**

$$N_{prim} = \frac{V_{i\min} \cdot t_{on\max}}{\Delta B_{\max} \cdot A_{\min}} \qquad (0.9)$$

dove:

$N_{prim}$ : Numero di spire al primario
$V_{imin}$ : Tensione di ingresso minima in **V**(dc)
$t_{onmax}$ : Periodo massimo di chiusura in **ms**
$\Delta B_{max}$ : Flusso massimo in **T**
$A_{min}$ : Superficie minima della ferrite in **mm²**

## 10. Stima della resistenza in DC dell'avvolgimento primario.

Nella stima del valore della resistenza dell'avvolgimento primario vengono usati dei valori medi indicati nella documentazione del supporto (*coil former)* relativamente alle dimensioni della ferrite usata. La formula empirica che permette di stimare la resistenza dell'avvolgimento è:

$$R_{t_prim} = \frac{N^2 \cdot l_N \cdot r_{Cu}}{0,5 \cdot A_N \cdot f_{Cu}} \cdot \left(1 + a_{Cu} \Delta T\right) \qquad (0.10)$$

dove:

$R_{t_prim}$ : resistenza avvolgimento primario a (20°C+ΔT) in **W**
N : numero di spire
$l_N$ : lunghezza media di una spira (ricavabile da catalogo) in **m**
$\rho_{Cu}$ : resistivitàspecifica del rame a 20°C in **W mm²/m** (0,0172 )
$A_N$ : area della sezione del supporto usabile (ricavabile da catalogo) in **mm²**
$f_{Cu}$ : fattore di accomodamento del rame (0,25)
$\alpha_{Cu}$ : coefficiente di temperatura del rame (4,3 *$10^{-3}$ /°C)
ΔT : incremento della temperatura oltre i 20°C

### 11. Calcolo del numero di spire al secondario.

Nel calcolo del numero di spire al secondario è necessario individuare con buona approssimazione il reale valore della tensione applicata al primario e tensione necessaria al secondario. Per tale ragione vengono prese in considerazione le cadute di tensione al diodo raddrizzatore connesso all'avvolgimento secondario, stimata in $V_d$= 2V, e quella ai capi dell'elemento di commutazione (Transistor o Mosfet) stimata in $V_{TR}$=10V.

**Forward**

$$N_{\sec} = \frac{(V_o + V_d) \cdot N_{prim}}{(V_{i\min} - V_{TR}) \cdot t_v} \qquad (0.11)$$

**Flyback**

$$N_{\sec} = \frac{(V_o + V_d) \cdot (1 - t_v) \cdot N_{prim}}{V_{i\min} \cdot t_v} \qquad (0.12)$$

dove:
$N_{sec}$ : Numero di spire al secondario
$V_o$ : Tensione continua richiesta in uscita in **V**
$V_d$ : Caduta di tensione stimata sul diodo raddrizzatore di uscita in **V**
$t_v$ : *Duty Cycle*
$N_{prim}$ : Numero di spire al primario
$V_{imin}$ : Tensione di ingresso minima in **V**(dc)
$V_{TR}$ : Caduta di tensione stimata sull'elemento di commutazione in **V**

### 12. Calcolo della sezione degli avvolgimenti

$$A_{Cu} = \frac{0,5 \cdot A_N \cdot f_{Cu}}{N} \qquad (0.13)$$

dove:
$A_{Cu}$ : Sezione stimata dell'avvolgimento in **mm²**
$A_N$ : Area della sezione del supporto usabile (ricavabile da catalogo) in **mm²**
$f_{Cu}$ : Fattore di accomodamento del rame (0,25)
N : Numero di spire

## 13. Calcolo della corrente al primario del trasformatore

Il calcolo della corrente al primario del trasformatore viene fatto con procedure diverse a seconda della tipologia del circuito.

### Forward

La corrente trapezoidale nel primario è approssimata a rettangolare. Viene presa in considerazione la corrente di magnetizzazione $\Delta I_{mag}$.

$$L_{prim} = N_{prim}^2 \cdot A_L \qquad (0.14)$$

dove:
$L_{prim}$ : Induttanza primario in **H**
$N_{prim}$ : Numero di spire al primario
$A_L$ : Fattore di induttanza in **H/spire²** (vedi catalogo)

$$\Delta I_{mag} = \frac{V_{i\min} \cdot t_{on\max}}{L_{prim}} \qquad (0.15)$$

dove:
$\Delta I_{mag}$ : Corrente di magnetizzazione in **A**
$V_{imin}$ : Tensione di ingresso minima in **V**(dc)
$t_{onmax}$ : Periodo massimo di chiusura in **s**
$L_{prim}$ : Induttanza primario in **H**

$$I_{prim_\max} = I_o \cdot \frac{N_{\sec}}{N_{prim}} + \frac{1}{2} \cdot \Delta I_{mag} \qquad (0.16)$$

dove:
$I_{prim_max}$ : Corrente massima al primario in **A**
$I_O$ : Corrente massima in uscita in **A**(dc)
$N_{sec}$ : Spire al secondario
$N_{prim}$ : Spire al primario
$\Delta I_{mag}$ : Corrente di magnetizzazione in **A**

### Flyback

La corrente al primario viene assunta triangolare. Le perdite nel rame vengono considerate come equamente distribuite tra primario e secondario.

$$P_{VCu_prim} = P_{VCu_\sec} = \frac{P_{VCu}}{2} \qquad (0.17)$$

dove:
$P_{Vcu_prim}$: Perdite nel rame al primario in **W**
$P_{Vcu_sec}$ : Perdite nel rame al secondario in **W**
$P_{Vcu}$ : Perdite complessive nel rame in **W**

$$I_{prim_rms} = \sqrt{\frac{P_{VCu_prim}}{R_{prim(100°C)}}} \qquad (0.18)$$

dove:
$I_{prim_rms}$ : Corrente massima rms al primario in **A**
$P_{Vcu_prim}$: Perdite nel rame al primario in **W**
$R_{t_prim}$ : resistenza primario a 100°C in **W**

$$I_{prim_\max} = \frac{I_{prim_rms}}{\sqrt{\frac{t_{on\max}}{3T}}} \qquad (0.19)$$

dove:
$I_{prim_max}$ : Corrente massima al primario in **A**
$I_{prim_rms}$ : Corrente massima rms al primario in **A**
$t_{onmax}$ : Periodo massimo di chiusura in **s**

- **Considerazioni ulteriori per la tipologia Flyback**

**14. Calcolo del valore massimo dell'induttanza dell'avvolgimento primario.**

$$L_{prim_\max} = \frac{\Delta B_{\max} \cdot N_{prim} \cdot A_{\min}}{I_{prim_\max}} \qquad (0.20)$$

dove:
$L_{prim_max}$: Induttanza massima al primario in **H**
$\Delta B_{max}$ : Flusso massimo in **T**
$N_{prim}$ : Numero di spire al primario
$A_{min}$ : Superficie minima della ferrite in **m²**
$I_{prim_rms}$ : Corrente massima rms al primario in **A**

**15. Calcolo del valore massimo del fattore di induttanza $A_L$.**

$$A_{L\max} = \frac{L_{prim_\max}}{N_{prim}^2} \qquad (0.21)$$

dove:
$A_{Lmax}$ : Massimo valore del fattore di induttanza in **H/spire²**
$L_{prim_max}$: Induttanza massima al primario in **H**
$N_{prim}$ : Numero di spire al primario

**16. Determinazione del valore del traferro (*gap*).**

La determinazione del valore del traferro può essere fatta consultando il catalogo. Per ogni tipo di ferrite sono indicati i parametri elettrici e meccanici, oltre all'indicazione dei seminuclei disponibili con traferro ed i relativi valori di $A_L$ ottenibili. In alternativa, se il valore di $A_L$ richiesto non è tra quelli disponibili, è possibile approssimare il valore richiesto inserendo tra i seminuclei degli spessori sino a raggiungere il valore di traferro richiesto. Tale valore può essere stimato con la formula che segue **valida per i materiali N27, N67, N87 per 0,10<s<3,00mm**:

$$s = \left( \frac{A_L}{K1} \right)^{\frac{1}{K2}} \qquad (0.22)$$

dove:
s : Valore del traferro in **mm**
$A_L$ : Valore del fattore di induttanza in **nH**
K1,K2 : Costanti specifiche del nucleo (da catalogo)

**Nota**: Se il traferro viene ottenuto con l'introduzione di spessori tra i due seminuclei ad **E**, considerare che il circuito magnetico viene interrotto in due punti, in realtà sono tre, ma un punto con sezione S (colonna centrale), e due con sezione S/2 (colonne esterne), quindi la dimensione degli spessori da inserire dovrà essere la metà di quella calcolata.

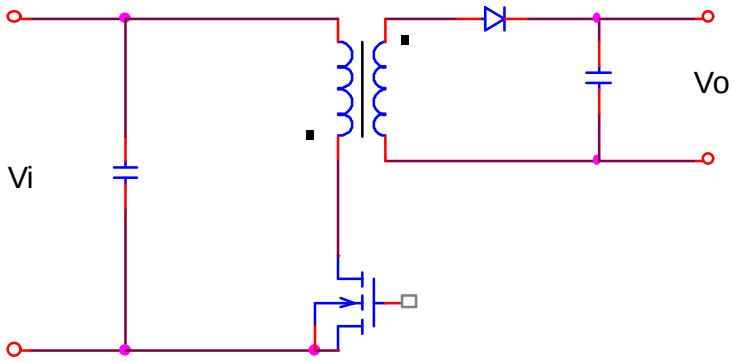
## 17. Potenza trasferita da trasformatore.

$$P_{\max} = \frac{I_{pri_\max}^2 \cdot L_{pri_\max} \cdot f}{2} \qquad (0.23)$$

dove:
$P_{max}$ : Potenza massima trasferibile in **W**
$I_{prim_rms}$ : Corrente massima rms al primario in **A**
$L_{prim_max}$: Induttanza massima al primario in **H**
f : Frequenza in **Hz**

# 3. Trasformatore per convertitore *Flyback* : esempio di calcolo.

- **Dati di partenza:**




| | |
|---|---|
| Potenza in uscita ≈ : | 405W |
| Tensione in uscita $V_o$ : | 27 V |
| Corrente in uscita $I_o$ : | 15 A |
| Tensione di rete $V_{R:}$ | 220 Vac ± 20% |
| Frequenza di rete $f_r$ : | 50Hz |
| Frequenza di commutazione f : | 100KHz |

**1. Dai dati di partenza, tramite l'ausilio della Tabella 1 viene individuata nella ETD49 – N67 la ferrite adatta per la realizzazione del trasformatore. Dal catalogo ricaviamo le caratteristiche magnetiche sotto riportate.**

**Magnetic characteristics** (per set)

| | | |
|---|---|---|
| $\Sigma l/A=$ | 0,54 | $mm^{-1}$ |
| $l_e =$ | 114 | mm |
| $A_e =$ | 211 | $mm^2$ |
| $A_{min}=$ | 209 | $mm^2$ |
| $V_e =$ | 24100 | $mm^3$ |

**Approx. weight** 124 g/set

**2. Tramite la Tabella 2 si individua che la sovratemperatura massima permessa per ferriti realizzate con materiale N67 e di 40°C.**

**3. Tramite la Tabella 3 si individua il valore della resistenza termica del trasformatore per la ETD49 in 8°C/W.**

**4. Si calcola la potenza massima dissipabile per le perdite nella ferrite e nel rame degli avvolgimenti tramite la** (0.2)

$$P_{Vtot} = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{40\,°C}{8\,°C/W} = 5\,W$$

**5. Si calcola il valore minimo della tensione continua in ingresso tramite la** (0.3)

| | | |
|---|---|---|
| Dati noti: | tensione di linea: | $V_R = 220 \pm 20\%\ Vac$ |
| | frequenza di rete | $f_r = 50Hz$ |
| | max tensione di picco: | $V_{Ri\max} = \left(220 + \frac{220 \cdot 20}{100}\right)\sqrt{2} = 373V$ |
| | min tensione di picco | $V_{Ri\min} = \left(220 - \frac{220 \cdot 20}{100}\right)\sqrt{2} = 249V$ |

| | | |
|---|---|---|
| Dati presunti: | Rendimento | $h = 0{,}8$ |
| | Potenza in ingresso | $P_i = \frac{405}{0{,}8} = 506W$ |
| | Valore condensatore ingresso | $C_i = 1000mF$ |

Determinazione della minima tensione in ingresso:

$$V_{i\min} = \sqrt{(249V)^2 - \frac{506W}{1 \cdot 10^{-3} F \cdot 50Hz}} \approx 228V$$

Si riduce ulteriormente di circa 10V il valore calcolato per tenere conto delle cadute di tensione dovute alla resistenza dell'avvolgimento ed ai diodi alla massima potenza.

$$V_{i\min} = 228 - 10 = 218V$$

**6. Distribuzione della potenza persa tramite la** (0.5)

$$P_{VFe} = P_{VCu} = \frac{P_{Vtot}}{2} = \frac{5}{2} = 2{,}5W$$

**7. Calcolo della potenza persa specifica in volume per la ferrite ETD49 tramite la** (0.6)**.**

Dati noti:

Potenza persa in onda quadra $P_{V\Pi} = 0{,}8 \bullet P_{V\sin}$ $K_{Form} = 0{,}8$

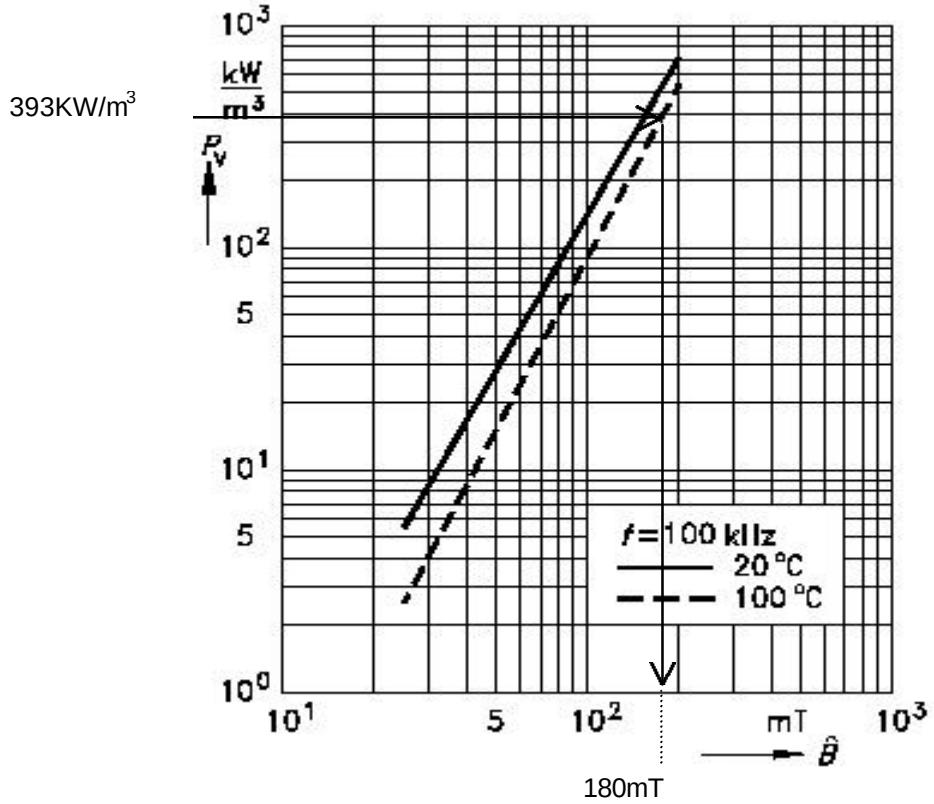
Perdite *single-ended* vs *push-pull* $K_{hyst} = \frac{P_{Vse}}{P_{Vpp}} = 0{,}33$

Considerando che il volume di una coppia di ferriti ETD49 è di 24100mm$^3$ la perdita di potenza specifica per unità di volume sarà

$$P_{Vmat} = \frac{2{,}5W}{0{,}8 \cdot 0{,}33 \cdot 24100mm^3} = 393KW/m^3$$

Dal diagramma sotto riportato relativo al materiale scelto N67 Pv=f(*f*) per f=100KHz e T=100°C si ricava un $\Delta B_{max} \approx$ 180mT.

**8. Determinazione del flusso massimo ammesso $DB_{max}$ in funzione delle perdite nella ferrite.**




Tramite la (0.7) possiamo determinarci anche per via analitica il valore massimo ammesso per l'induzione, che per materiale N67 a 100°C e con frequenza di 100KHz risulta essere:

$$B = \frac{10^{\left(1{,}31453+0{,}3992\log 393-0{,}01358\log^2 396\right)}}{1000} = 0{,}182T$$

**9. Calcolo del numero di spire al primario tramite la** (0.8) **e** (0.9)**.**

Duty Cycle: $t_v$=0,5

Massimo tempo di chiusura:

$$t_{on\max} = \frac{1}{0{,}1MHz} \cdot 0{,}5 = 5ms$$

$$N_{prim} = \frac{218V \cdot 5ms}{0{,}181T \cdot 209mm^2} \approx 29\ Spire$$

**10. Stima della resistenza in DC dell'avvolgimento primario tramite la** (0.10)

$$R_{Prim(100°C)} = \frac{29^2 \cdot 86 \cdot 10^{-3} m \cdot 0{,}0172\Omega mm^2/m}{0{,}5 \cdot 269{,}4mm^2 \cdot 0{,}25} \cdot \left(1 + 4{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 80°C\right) \approx 50m\Omega$$

**Coil former**

Material:GFR polyterephthalate (UL 94 V-0, insulation class to IEC 85: F ≙ max. operating temperature 155 °C), color code black

Solderability: to IEC 68-2-20, test Ta, method 1 (aging 3): 235 °C, 2 s

Resistance to soldering heat: to IEC 68-2-20, test Tb, method 1B: 350 °C, 3,5 s

Winding:see page 154

**Yoke**

Material:Stainless spring steel (0,4 mm)

| Coil former | | | | | Ordering code | PU |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sections | $A_N$ mm² | $l_N$ mm | $A_R$ value µΩ | Pins | | Pcs |
| 1 | 269,4 | 86 | 11 | 20 | B66368-A1020-T1 | 100 |
| Yoke (ordering code per piece, 2 are required) | | | | | B66368-A2000 | 100 |

Coil former Yoke

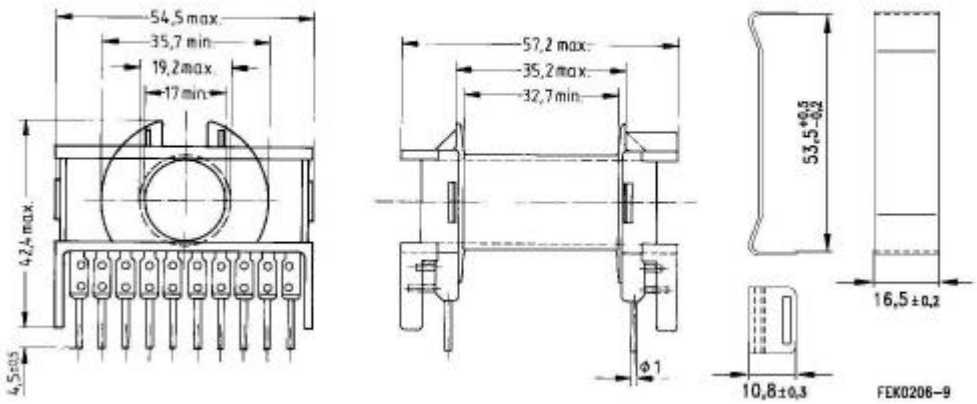



**Figura 3 - Parametri del supporto per ETD49 Ferrites and Accessories, Siemens Matsushita Components).**

**11. Calcolo del numero di spire al secondario tramite la** (0.12)**.**

Nel calcolo del numero di spire al secondario è necessario individuare con buona approssimazione il reale valore della tensione applicata al primario e tensione necessaria al secondario. Per tale ragione vengono prese in considerazione le cadute di tensione al diodo dell'avvolgimento secondario, stimata in $V_d$= 2V.

$$N_{\sec} = \frac{(27+2)\cdot(1-0{,}5)\cdot 0{,}5\cdot 29}{218\cdot 0{,}5} \simeq 4\ Spire$$

Pur ottenendo un numero di spire non intero, esso viene approssimato all'intero più prossimo. In alternativa, in modo interattivo, si potrebbe ricalcolare il numero di spire al primario affinché il numero di spire al secondario sia intero. Si consideri comunque che il numero di spire al primario è inversamente proporzionale al flusso, quindi per evitare che quest'ultimo aumenti, il numero di spire al primario può essere solo aumentato.

**12. Calcolo della sezione degli avvolgimenti tramite la** (0.13)**.**

$$A_{Cu-prim} = \frac{0{,}5\cdot 269{,}4\cdot 0{,}25}{29} = 1{,}16mm^2 \qquad (0.24)$$

$$A_{Cu-\sec} = \frac{0{,}5\cdot 269{,}4\cdot 0{,}25}{4} = 8{,}4mm^2 \qquad (0.25)$$

**13. Calcolo della corrente primaria tramite la** (0.17)**,** (0.18)**,** (0.19)**.**

La corrente al primario viene assunta di forma triangolare. Le perdite nel rame vengono considerate equamente suddivise tra primario e secondario.

$$P_{VCu_prim} = \frac{2{,}5W}{2} = 1{,}25W$$

$$I_{prim_rms} = \sqrt{\frac{1{,}25W}{50\cdot 10^{-3}\Omega}} = 5A$$

$$I_{prim_\max} = \frac{5A}{\sqrt{\frac{5\cdot 10^{-6}s}{3\cdot 10\cdot 10^{-6}s}}} = 12{,}2A$$

**14. Calcolo del valore massimo di induttanza ammesso al primario tramite la** (0.20)**.**

$$L_{prim_\max} = \frac{0{,}182T \cdot 29 \cdot 209 \cdot 10^{-6} m^2}{12{,}2A} = 90{,}4mH$$

**15. Calcolo del valore massimo del fattore di induttanza $A_L$ tramite la** (0.21)**.**

$$A_{L\max} = \frac{90{,}4mH}{29^2} = 107nH$$

Se il rapporto tra lo spessore dell'avvolgimento e la sua larghezza è basso, il valore di $A_L$ può ridursi; inoltre la tolleranza nel valore di $A_L$ per tipo di ferrite scelta, codificata come classe G, è del ± 2%. Di conseguenza considerando 106nH come valore massimo possiamo determinare il valore medio stimando uno scostamento massimo di $A_L$ del 10% (dato empirico):

$$A_L = 107nH - \left(0{,}1 \cdot 107nH\right) \approx 96nH$$

$$A_L = 96nH \pm 10\%$$

**16. Determinazione del valore del traferro (*gap*) tramite la** (0.22)**.**

Noto il valore di $A_L$ viene determinato il valore del traferro (*gap*). Tramite il catalogo è possibile individuare il seminucleo con *gap* prossimo al valore di $A_L$ calcolato, oppure tramite formula stimarne il valore, che può essere raggiunto combinando seminuclei con diversi valori di *gap*. Ciò rappresenta la soluzione migliore, quando possibile, per contenere il flusso disperso e di conseguenza l'induttanza parassita. Diversamente il valore di traferro necessario viene raggiunto interponendo tra i seminuclei degli spessori.

**Gapped**

| Material | *g* mm | $A_L$ value approx. nH | $\mu_e$ | Ordering code ** = 27 (N27) = 67 (N67) | PU Pcs |
|---|---|---|---|---|---|
| N27, N67 | 0,20 ± 0,02 | 1035 | 444 | B66367-G200-X1** | 100 |
| | 0,50 ± 0,05 | 525 | 225 | B66367-G500-X1** | |
| | 1,00 ± 0,05 | 314 | 135 | B66367-G1000-X1** | |
| | 2,00 ± 0,05 | 188 | 81 | B66367-G2000-X1** | |

The $A_L$ value in the table applies to a core set comprising one ungapped core (dimension $g = 0$) and one gapped core (dimension $g > 0$).

**Calculation factors**

| Material | Relationship between air gap - $A_L$ value | | Calculation of saturation current | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *K1*(23°C) | *K2*(23°C) | *K3*(23°C) | *K4*(23°C) | *K3*(100°C) | *K4*(100°C) |
| N27 | 314 | -0,741 | 504 | -0,847 | 470 | -0,865 |
| N67 | 314 | -0,741 | 480 | -0,82 | 476 | -0,881 |
| N87 | 314 | -0,741 | 485 | -0,796 | 460 | -0,873 |

Validity range: *K1*, *K2*: 0,10 mm < *s* < 3,50 mm
*K3*, *K4*: 120 nH < $A_L$ < 1160 nH

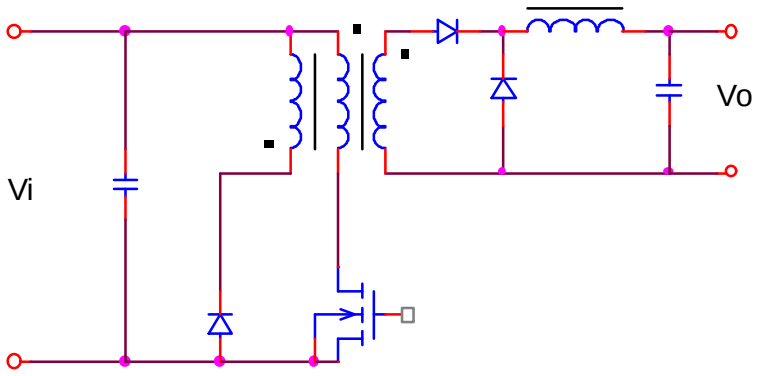
$$s = \left( \frac{96nH}{314} \right)^{\frac{1}{-0,741}} = 4,94mm$$

La (0.22) ci ricorda che la validità della formula è ristretta a valori di *gap* compresi tra 0,10 e 3,00mm, quindi con molta probabilità il valore di 5,02mm non sarà adeguato per una $A_L$ di 95nH. In questi casi è necessario misurare il valore dell'induttanza del primario e adattare il *gap* sino ad ottenere il valore calcolato.

**17. Potenza massima trasferita da trasformatore tramite la** (0.23)**.**

$$P_{\max} = \frac{(12,2A)^2 \cdot 90,4 \cdot 10^{-6} H \cdot 100 \cdot 10^3 Hz}{2} = 673 W$$

# 4.Trasformatore per convertitore *Forward* : esempio di calcolo.




- **Dati di partenza:**

| | |
|---|---|
| Potenza in uscita ≈ : | 600W |
| Tensione in uscita $V_o$ : | 30V |
| Corrente in uscita $I_o$ : | 20A |
| Tensione di rete $V_R$: | 220 Vac ± 20% |
| Frequenza di rete $f_r$ : | 50Hz |
| Frequenza di commutazione f : | 100KHz |

**1. Dai dati di partenza, tramite l'ausilio della Tabella 1 viene individuata nella ETD49 – N67 la ferrite adatta per la realizzazione del trasformatore. Dal catalogo ricaviamo le caratteristiche magnetiche sotto riportate. Per informazione più esaustive consultare il catalogo. ($A_L$=3700nH +30/-20%).**

**Magnetic characteristics** (per set)

| | | |
|---|---|---|
| $\Sigma l/A=$ | 0,54 | $mm^{-1}$ |
| $l_e$ = | 114 | mm |
| $A_e$ = | 211 | $mm^2$ |
| $A_{min}$= | 209 | $mm^2$ |
| $V_e$ = | 24100 | $mm^3$ |

**Approx. weight** 124 g/set

**2. Tramite la Tabella 2 si individua che la sovratemperatura massima permessa per ferriti realizzate con materiale N67 e di 40°C.**

**3. Tramite la Tabella 3 si individua il valore della resistenza termica del trasformatore per la ETD49 in 8°C/W.**

**4. Si calcola la potenza massima dissipabile per le perdite nella ferrite e nel rame degli avvolgimenti** (0.2)

$$P_{Vtot} = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{40\,°C}{8\,°C/W} = 5\,W$$

**5. Si calcola il valore minimo della tensione continua in ingresso** (0.3)

Dati noti:

| | | |
|---|---|---|
| | tensione di linea: | $V_R = 220 \pm 20\%\ Vac$ |
| | Frequenza di rete | $f_r = 50Hz$ |
| | Max tensione di picco: | $V_{Ri\max} = \left(220 + \frac{220 \cdot 20}{100}\right)\sqrt{2} = 373V$ |
| | Min tensione di picco | $V_{Ri\min} = \left(220 - \frac{220 \cdot 20}{100}\right)\sqrt{2} = 249V$ |

Dati presunti:

| | | |
|---|---|---|
| | Rendimento | $h = 0,8$ |
| | Potenza in ingresso | $P_i = \frac{600}{0,8} = 750W$ |
| | Valore condensatore ingresso | $C_i = 1000mF$ |

Determinazione della minima tensione in ingresso:

$$V_{i\min} = \sqrt{(249V)^2 - \frac{750W}{1000mF \cdot 50Hz}} \approx 217V$$

**6. Distribuzione della potenza persa** (0.5)

$$P_{VFe} = P_{VCu} = \frac{P_{Vtot}}{2} = \frac{5}{2} = 2,5W$$

**7. Calcolo della potenza persa specifica in volume per la ferrite ETD49** (0.6)**.**

Dati noti:

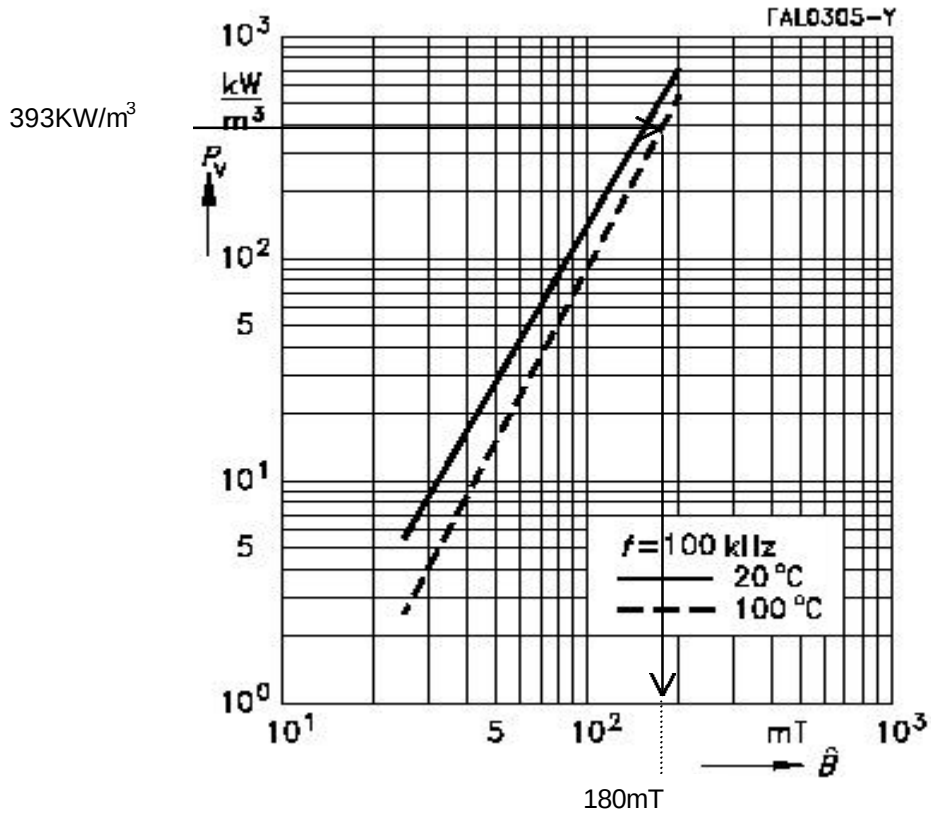
| | | |
|---|---|---|
| Potenza persa in onda quadra | $P_{V\Pi} = 0,8 \cdot P_{V\sin}$ | $K_{Form} = 0,8$ |
| Perdite *single-ended* vs *push-pull* | $K_{hyst} = \frac{P_{Vs-e}}{P_{Vp-p}} = 0,33$ | |

Considerando che il volume di una coppia di ferriti ETD49 è di 24100mm$^3$ la perdita di potenza specifica per unità di volume sarà

$$P_{Vmat} = \frac{2,5W}{0,8 \cdot 0,33 \cdot 24100mm^3} = 393KW / m^3$$

Dal diagramma sotto riportato relativo al materiale scelto N67 Pv=f(*f*) per f=100KHz e T=100°C si ricava un $\Delta B_{max} \approx 180mT$.

**8. Determinazione del flusso massimo ammesso $DB_{max}$ in funzione delle perdite nella ferrite.**




**9. Calcolo del numero di spire al primario** (0.8) **e** (0.9)**.**

Il duty cycle massimo è inferiore a 0,5 per consentire la smagentizzazione completa del nucleo

Duty Cycle: $t_v$=0,4

Massimo tempo di chiusura:

$$t_{on\max} = \frac{1}{0,1MHz} \cdot 0,4 = 4ms$$

$$N_{prim} = \frac{217V \cdot 4ms}{0,180T \cdot 209mm^2} \approx 23\,Spire$$

**10. Stima della resistenza in DC dell'avvolgimento primario** (0.10)

$$R_{\Pr im(100°C)} = \frac{23^2 \cdot 86 \cdot 10^{-3} m \cdot 0{,}0172 \Omega mm^2 / m}{0{,}5 \cdot 269{,}4 mm^2 \cdot 0{,}25} \cdot \left(1 + 4{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 80°C\right) \approx 32 m\Omega$$

**11. Calcolo del numero di spire al secondario** (0.12)**.**

Nel calcolo del numero di spire al secondario è necessario individuare con buona approssimazione il reale valore della tensione applicata al primario e tensione necessaria al secondario. Per tale ragione vengono prese in considerazione le cadute di tensione al diodo raddrizzatore connesso all'avvolgimento secondario, stimata in $V_d$= 2V, e quella ai capi dell'elemento di commutazione (Transistor o Mosfet) stimata in $V_{TR}$=10V.

$$N_{\sec} = \frac{(30+2) \cdot 23}{(217-10) \cdot 0{,}4} \simeq 9\ Spire$$

Pur ottenendo un numero di spire non intero, esso viene approssimato all'intero più prossimo. In alternativa, in modo interattivo, si potrebbe ricalcolare il numero di spire al primario, affinché il numero di spire al secondario sia intero. Si consideri comunque che il numero di spire al primario è inversamente proporzionale al flusso, quindi per evitare che quest'ultimo aumenti, correndo il rischio di lavorare in zona di saturazione del nucleo, il numero di spire al primario può essere solo aumentato.

**12. Calcolo della corrente al primario** (0.14) (0.15) (0.16)**.**

La corrente trapezioidale nel primario è approssimata a rettangolare. Viene presa in considerazione la corrente di magnetizzazione $\Delta I_{mag}$.

$$L_{prim} = 23^2 \cdot 3700 nH = 1{,}96 mH$$

$$\Delta I_{mag} = \frac{217V \cdot 4 \cdot 10^{-6} s}{1{,}96 \cdot 10^{-3} H} = 0{,}443 A$$

$$I_{prim_\max} = 20A \cdot \frac{9}{23} + \frac{1}{2} \cdot 0{,}443 A = 8A$$

**13. Calcolo della sezione degli avvolgimenti** (0.13)**.**

Nella tipologia *forward* abbiamo un terzo avvolgimento usato per smagnetizzare il nucleo. La corrente che circola in questo avvolgimento è circa pari al valore della corrente di magnetizzazione [3]. Considerando una densità di corrente di 4A/mm$^2$ ed una corrente di magnetizzazione di 0,44A otteniamo :

$$S = \frac{0{,}443A}{4A/mm^2} \simeq 110mm^2 \rightarrow \Phi_{Cu} \simeq 0{,}375mm$$

Si sceglie pertanto tramite la Tabella 10 in appendice il filo di diametro 0,361mm (AWG27). Esso presenta una superficie leggermente minore di quella calcolata, ma nel complesso considerando anche l'aumento di resistenza per effetto pelle (usando un conduttore unico), come riportato dal grafico in Figura 8 e di circa l'1%, otteniamo comunque valori ancora accettabili.

Ipotizzando di effettuare l'avvolgimento su un unico strato, ipotesi plausibile visto che il numero di spire di questo avvolgimento è identico al numero di spire al primario e che lo sviluppo di 23 spire affiancate non supera la larghezza del supporto (23*0,4=9,2mm<<32.7mm), la sezione di area occupata da questo avvolgimento (un solo strato di altezza circa pari al diametro del conduttore e di larghezza uguale alla larghezza del supporto) otteniamo:

$$A_{Cu_mag} = 0{,}4 \cdot 32{,}7 = 13mm$$

La sezione di area disponibile sul supporto, decurtata di quella necessaria per realizzare l'avvolgimento di smagnetizzazione sarà dunque di:

$$A_N^{'} = A_N - A_{Cu_mag} = 269{,}4mm - 13mm = 256{,}4mm$$

e quindi per l'avvolgimento primario la sezione stimata di ingombro del conduttore (rame + isolante) sarà

$$A_{Cu-prim} = \frac{0{,}5 \cdot 256{,}4 \cdot 0{,}25}{23} = 1{,}39mm^2$$

mentre per il secondario otteniamo:

$$A_{Cu-\sec} = \frac{0{,}5 \cdot 256{,}4 \cdot 0{,}25}{9} = 3{,}56mm^2$$

# 5. Avvolgimenti: supporti, isolamenti e fili.

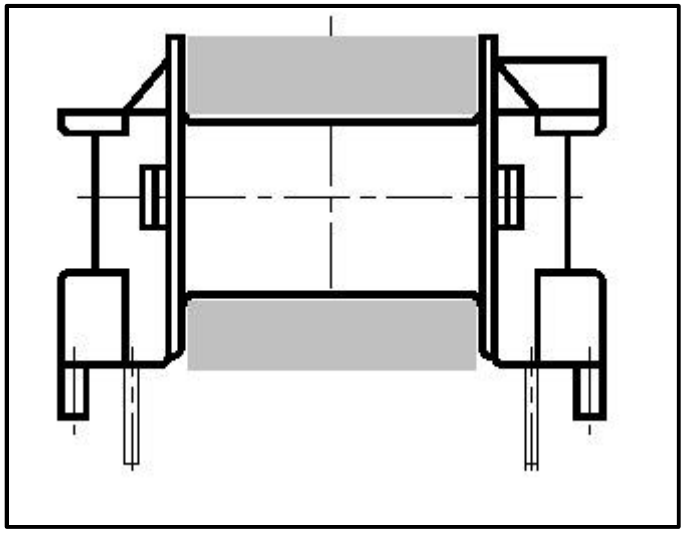


**Figura 4 - *Coil former* per montaggio orizzontale.**

Terminato il calcolo del numero di spire dobbiamo ora determinare su cosa effettuare gli avvolgimenti, come effettuarli e con cosa.

## *Su cosa*

Normalmente ad ogni tipo di ferrite è associato un supporto (*coil former*) ben preciso individuabile da catalogo. Essi sono normalmente realizzati con materiale plastico (phenolformaldehyde PH [2], polyterephthalate GFR [1] ). Si presentano di solito con un'unica gola su cui vengono effettuati gli avvolgimenti del primario e del/i secondario/i. Dei piedini metallici (*pins*) permettono sia l'ancoraggio dei fili degli avvolgimenti, sia la connessione meccanica ed elettrica del trasformatore alla scheda.

È possibile scegliere il supporto a montaggio verticale, direzione verso cui si sviluppa prevalentemente l'ingombro, o il supporto a montaggio orizzontale. Nella Figura 4 è riportato il disegno di un supporto a montaggio orizzontale, l'area in grigio rappresenta la sezione teorica a disposizione per gli avvolgimenti, ma vedremo in seguito che ciò è vero solo per applicazioni a bassa tensione. Sempre dal catalogo è possibile ricavare, oltre alle dimensioni, altri parametri relativi al supporto come l'area disponibile per gli avvolgimenti $A_N$ e la lunghezza media di una spira $l_N$.

Nelle applicazioni dove il primario del trasformatore è direttamente connesso alla rete le norma EN60950 impone il rispetto di distanze minime tra gli avvolgimenti [2][4][9][10]. Viene definita come *creepage distance* il percorso più breve di superficie tra due diversi circuiti elettrici. Nelle applicazioni considerate nella guida, con primario connesso alla rete 230Vac (≈ 325Vcc), il valore della distanza superficiale minima è di 4mm, per l'isolamento normale, mentre per l'isolamento rinforzato si raddoppia il valore, quindi 8mm.

Dunque nella realizzazione degli avvolgimenti, non sarà possibile sfruttare tutta la larghezza del supporto, ma dovranno essere lasciati dei margini laterali di 4 mm, per l'isolamento rinforzato, come visibile in Figura 5.

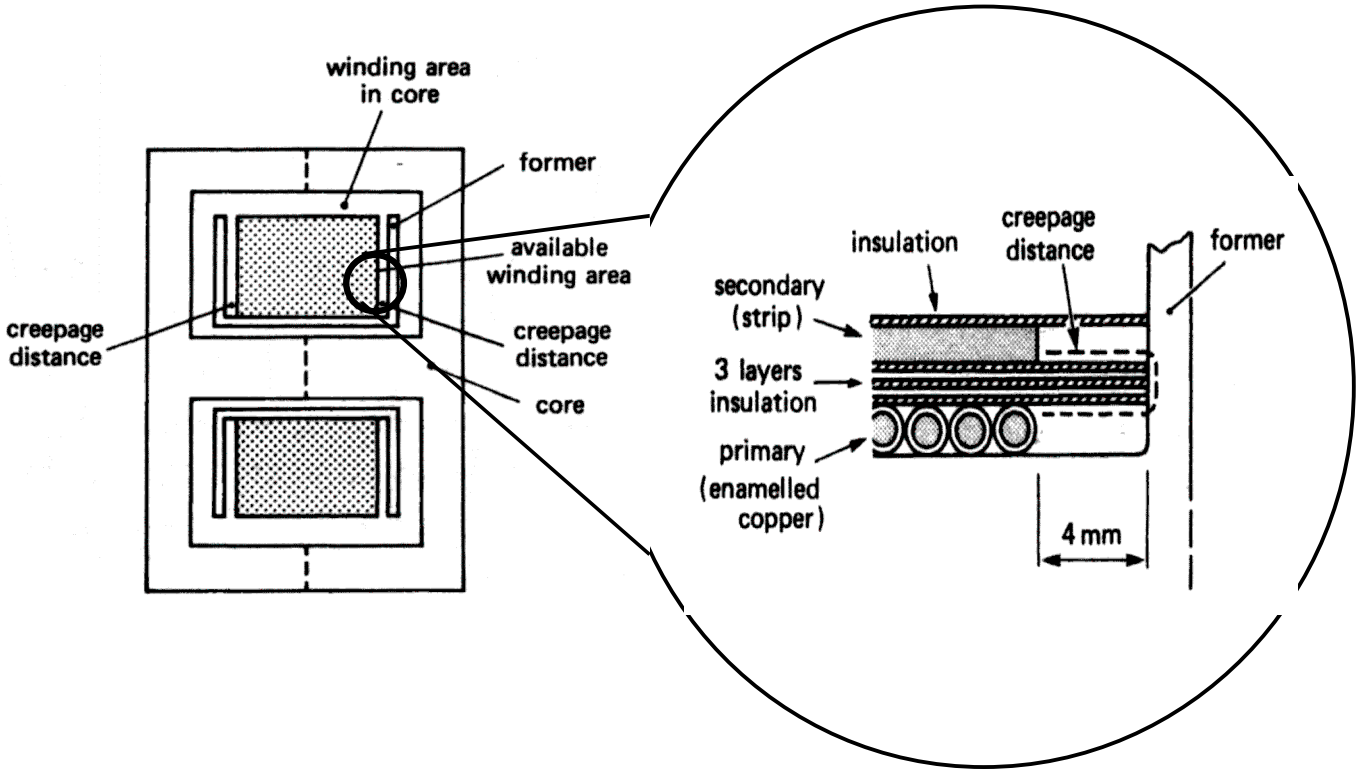



**Figura 5 - Rappresentazione schematica della sezione di un trasformatore con particolare della *creepage distance* (Soft Ferrites – Data Handbook, Philips Components).**

## *Come*

Nella realizzazione di un trasformatore per alimentatori a commutazione oltre alle perdite nella ferrite, per l'isteresi e le correnti parassite, e a quelle nel rame, dovute alla resistenza elettrica del conduttore, esistono altri elementi che creano non pochi problemi, tra essi ricordiamo la capacità e l'induttanza parassita.

La capacitàparassita si presenta tra spira e spira, tra strato e strato e soprattutto tra primario e

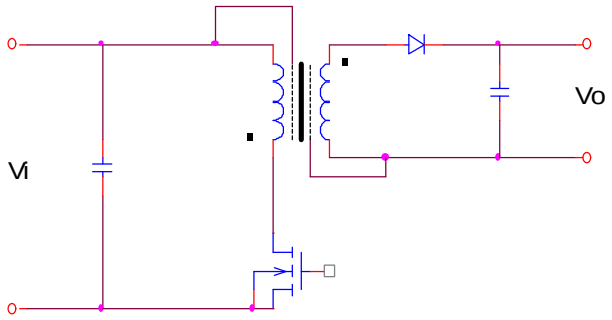



**Figura 6 - Esempio di schermo elettrostatico tra primario e secondario.**

secondari/o. È possibile studiare il fenomeno da un punto di vista analitico e ricavare il modello che descrive le capacità di accoppiamento degli avvolgimenti [6]. La necessità di ridurre gli effetti dell'accoppiamento capacitivo tra i diversi circuiti può essere affrontata con l'aggiunta di schermi elettrostatici, come mostrato in Figura 7 . In tale modo oltre a diminuire la capacità di accoppiamento tra primario e secondario, si beneficia anche della riduzione di emissioni elettromagnetiche al secondario (EMI). Gli schermi vengono realizzati avvolgendo delle strisce conduttive (alluminio o rame) tra gli avvolgimenti; è opportuno ricordare che essi non devono realizzare delle spire in corto, e che tra schermo ed avvolgimento è necessario assicurare l'isolamento previsto dalle norme precedentemente citate.

L'induttanza parassita viene originata dal fatto che non tutte le linee di flusso si concatenano tra primario e secondari/o, ma siamo sempre e comunque in presenza di flusso disperso, questo nonostante le geometrie dei nuclei siano studiate per ridurne l'entità Il valore dell'induttanza parassita può essere contenuto suddividendo il primario in due o più strati ed avvolgendo il secondario in mezzo [3] [6]. Valgono sempre le considerazioni precedentemente fatte per l'isolamento tra primario e secondario. Sempre al fine di mantenere basso il valore dell'induttanza parassita è opportuno evitare, dove possibile, la realizzazione del traferro tramite l'interposizione di spessori sulle colonne esterne dei seminuclei. È preferibile usare i seminuclei appositi realizzati con la colonna centrale più corta.

Il valore dell'induttanza parassita o di dispersione può essere misurato, ciò viene effettuato misurando l'induttanza del primario con il secondario in chiuso in corto circuito, mentre per misurare l'induttanza del primario il secondario deve essere lasciato aperto. Se possibile è bene effettuare le misure alla stessa frequenza per la quale il trasformatore è stato progettato. Il rapporto tra il valore dell'induttanza parassita e l'induttanza del primario dovrebbe essere minore del 1-2%. Esso può essere anche stimato con la formula che segue:

$$L_s = m_0 N_P^2 \frac{l_n}{w}\left(x + \frac{y}{3}\right) \qquad (0.26)$$

dove:

$L_\sigma$ : Induttanza di dispersione in **H**
$\mu_0$ : costante magnetica 12,56 * $10^{-9}$ **H/cm**
$N_P$ : numero di spire al primario
$l_n$ : lunghezza media della spira in **cm**
w : larghezza massima dell'avvolgimento in **cm**
x : spessore dell'isolante di separazione tra primario e secondario in **cm**
y : profondità degli avvolgimenti in **cm**

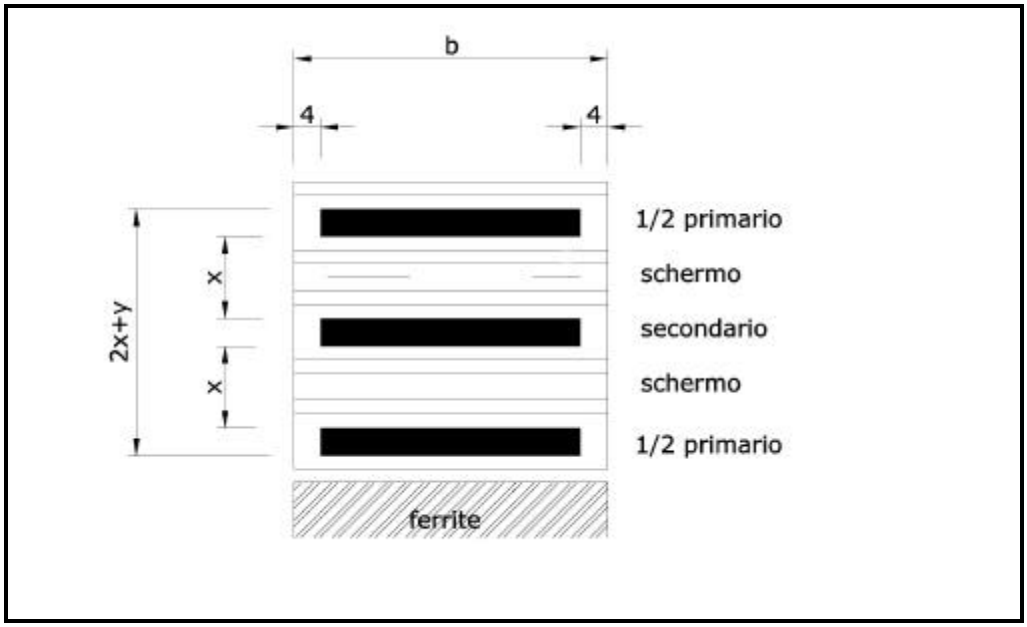



**Figura 7 - Sezione di trasformatore: primario su due strati con secondario interposto.**

## *Con cosa*

I conduttori comunemente usati per trasformatori di questo tipo sono fili di rame isolato con un film plastico. Nel mondo anglosassone vengono denominati *magnet wire*, in quanto sono usati in circuiti per produrre campi magnetici (trasformatori, induttori, relè ecc.). I principali parametri che caratterizzano questi conduttori sono il calibro o diametro nominale, il tipo di isolante e/o il suo spessore, la classe termica dell'isolante ed altre caratteristiche marginali quali il colore dell'isolante, la saldabilità ecc. La tabella che segue tratta da [15] mostra un elenco di nomi di famiglie di conduttori di rame smaltato, ne indica la disponibilità in sezioni rotonde o quadre/rettangolari, il limite di temperatura di funzionamento. Il numero NEMA (National Electrical Mfrs Association) è riferito ad un elenco pubblicato dalla NEMA che standardizza i calibri dei conduttori negli USA.

| | | Availability | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Product name** | **Insulation** | **Conductor** | **Rd** | **Sq & Rect** | **Thermal Class** | **UL Listed** | **NEMA Number** |
| PIREFORM | Polyvinyl formal | Copper | • | • | 105 | • | MW 15-C, 8-C |
| PIRESOLD | Polyurethane | Copper | • | | 130/155 | • | MW 75-C/79-C |
| PIRESOLD NY | Polyurethane overcoated with polyamide | Copper | • | | 130/155 | • | MW 28-C/80-C |
| PIRETERM | Polyesterimide(hermetics) | Copper | • | | 180 | • | MW 72-C |
| PIRETERM W | Polyesterimide | Copper | • | • | 180 | • | MW 30-C |
| PIRETERM SD | Solderable Polyesterimide | Copper | • | | 180 | • | MW 77-C |
| PIRETERM_NY_SD | Solderable Polyesterimide overcoated w/polyamide | Copper | • | | 180 | • | MW 78-C |
| POLITERM | Polyesterimide overcoated with polyamide-imide | Copper | • | • | 200 | • | MW 35-C/73-C, 36C |
| POLITEMP | Polyimide | Copper | • | • | 200 | | MW_16-C/71-C, 20-C |

**Tabella 4 - Dimerse tipologie di conduttori smaltati per avvolgimenti della PIREMAG.**

Nella Tabella 10 sono riportate le dimensioni nominali del fili di rame smaltato, con le variazioni minime e massime del calibro dovute al rivestimento del film isolante . I calibri dei conduttori sono indicati come AWG (American Wire Gauge) dove a numero più piccolo corrisponde filo di maggior sezione. Per effettuare la conversione tra AWG a pollici o millimetri si possono usare delle tabelle, oppure è possibile utilizzare le formule che seguono:

conversione da AWG a diametro nominale in pollici (*inch)*:

$$d = 0{,}005(92)^{\frac{36-AWG}{39}} \qquad (0.27)$$

conversione da AWG a millimetri:

$$d = 0{,}127(92)^{\frac{36-AWG}{39}} \qquad (0.28)$$

## *Effetto pelle e di prossimità.*

Nella determinazione delle perdite nel rame si considera la resistenza elettrica che il conduttore presenta al passaggio delle corrente. Nella stima del valore della resistenza elettrica abbiamo presunto che la corrente sì distribuisca in modo uniforme su tutta la sezione del conduttore. Lavorando a frequenze relativamente elevate è ora indispensabile considerare due fenomeni, l'effetto pelle e l'effetto di prossimità Il primo fa si che le zone più interne del conduttore presentino una reattanza maggiore di quelle periferiche, pertanto la distribuzione della corrente nella sezione del conduttore non sarà omogenea e si avranno densità di corrente maggiori in prossimità della superficie.

L'effetto di prossimità dovuto al campo generato dai conduttori adiacenti contribuisce ulteriormente ad una distribuzione tutt'altro che uniforme della corrente. Ci troviamo nella situazione di non usare tutta la sezione del conduttore, dunque il valore precedentemente calcolato di resistenza, in regime di corrente continua, dovrà essere corretto.

Una soluzione che ci consente di limitare questo fenomeno, e quindi virtualmente contenere l'aumento della resistenza, è l'utilizzo di conduttori in cui il diametro sia sufficientemente piccolo in relazione alla profondità di penetrazione della corrente, tanto da rendere l'aumento della resistenza alla frequenza di lavoro mediamente al di sotto del 1-5%.

La formula (0.29) ci consente di calcolare la profondità di penetrazione al di sotto della quale la densità di corrente è ridotta di $\frac{1}{e}$ ($\approx$ 37%) [8]

$$d = \sqrt{\frac{2r}{mw}} \qquad (0.29)$$

dove:

δ : profondità di penetrazione in **m**

ρ : resistività specifica (rame a 20°C 0,0172) in **W mm²**

μ : permeabilità (rame ≈ 1) in **H/m**

ω : pulsazione in **rad**

Dalla (0.29) per il rame a 20°C (ρ=0,0172, μ=1) si ottiene

$$d = \frac{74}{\sqrt{f}} \qquad (0.30)$$

dove:

δ : profondità di penetrazione in **mm**

f : frequenza in **Hz**

Pertanto il valore di resistenza in regime alternato possiamo stimarlo con la formula seguente [8]

$$R_{ac} = R_{cc}\left[1+\left(\frac{1}{48}\right)\left(\frac{r}{d}\right)^4\right] \qquad per \quad \frac{d}{r} > 1 \qquad (0.31)$$

dove:

r :raggio del conduttore cilindrico in **mm**

La procedura sopra descritta per la determinazione delle perdite nel rame, non è la più precisa ma fornisce buoni risultati. Altri approcci sono possibili, come indicato in [14] oppure, assai più pesante da un punto di vista di calcolo, come indicato in [6], dove in prima istanza viene calcolato il rapporto tra il valore della resistenza dell'avvolgimento in corrente alternata in regime sinusoidale ed il valore di resistenza in

corrente continua. Per valutare l'ammontare delle perdite in regime di onda quadra viene prima calcolato il valore di $R_{ac}$ poi vengono sommati i prodotti $R_{ac}*(I_n)^2$ dove $I_n$ è il valore della corrente della frequenza fondamentale e delle armoniche.

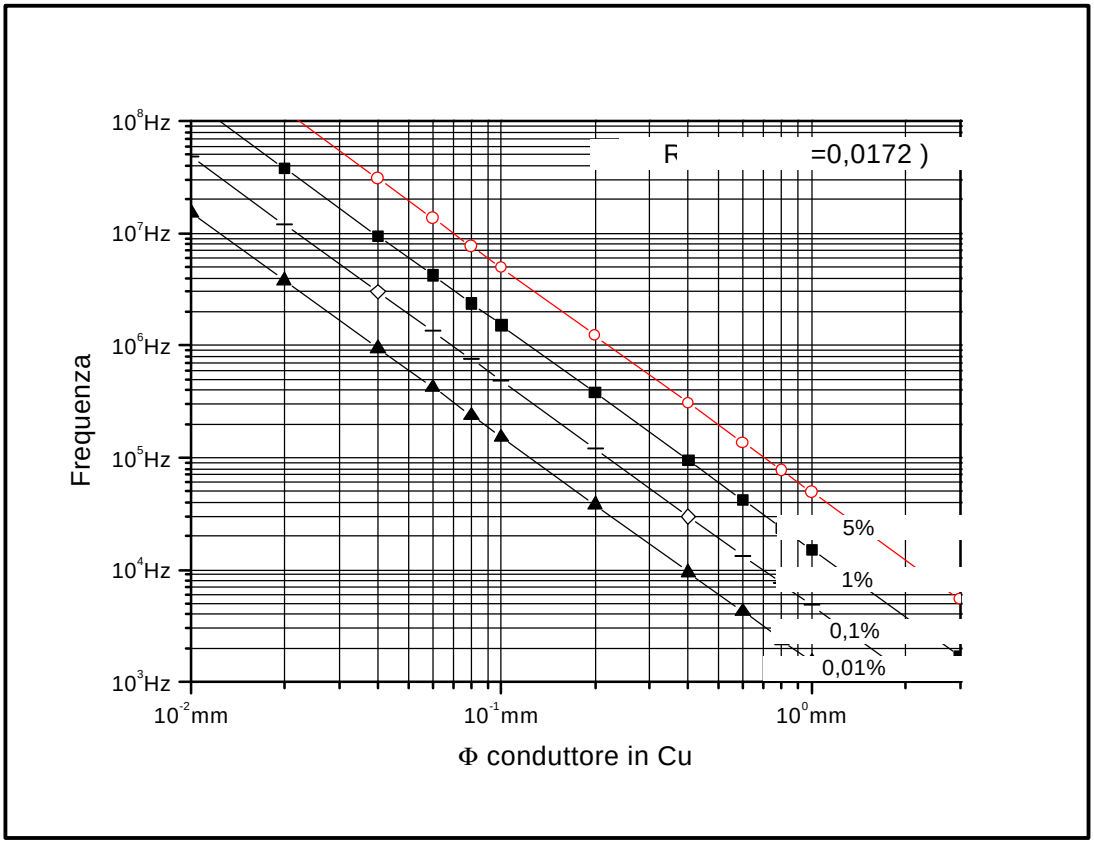
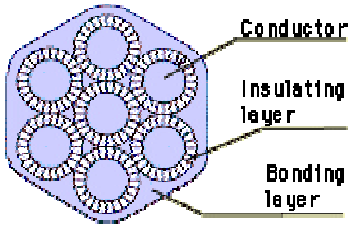



**Figura 8 - Aumento percentuale della resistenza del filo in funzione del diametro e della frequenza.**

Il grafico riportato in Figura 8, mostra l'aumento percentuale della resistenza del conduttore in rame pieno in funzione del suo diametro e della frequenza. L'uso di combinazioni Frequenza/Diametro tali da ricadere al di sotto dell'area delimitata dalla retta relativa ad un aumento del 0,1% della resistenza per l'effetto pelle, rappresenta la zona ottimale. L'area al di sopra della retta relativa all'aumento del 5% è da evitare.

Quindi per aumentare l'efficienza del trasformatore dobbiamo usare fili di dimensioni contenute, se il valore della corrente è alto, per mantenere a valori accettabili le densità di corrente si usano più fili in parallelo. Una semplificazione nella realizzazione degli avvolgimenti la possiamo ottenere usando filo **Litz**. Esso è composto da più fili di rame smaltato, quindi con un rivestimento isolante sulla superficie, opportunamente avvolti ad elica e racchiusi in una guaina. In tal modo possiamo sommare le sezioni di ogni singolo conduttore mantenendo comunque modesti gli aumenti di resistenza in alternata perché le dimensioni di ogni singolo conduttore sono piccole.




Il numero AWG, riferito al filo Litz, identifica il conduttore di sezione equivalente; esso può essere ottenuto con diverse combinazioni, ad esempio filo Litz AWG 20, equivalente ad un conduttore di sezione di 0,519mm$^2$ (804 mils$^2$), possiamo trovarlo realizzato con 4 conduttori AWG26, oppure 5*AWG27 o 6*AWG28, 8*AWG29, 10*AWG30, 13*AWG31, 16*AWG32, 20*AWG33. La sezione equivalente rimane circa la stessa, cambiano le dimensioni dei singoli conduttori, quindi possiamo aumentare l'efficienza del trasformatore scegliendo la combinazione migliore in funzione della frequenza di commutazione.

Giova comunque rammentare che se da un lato l'uso di filo Litz produce non pochi vantaggi, come ogni medaglia c'è anche il suo rovescio. Il valore di resistenza in continua, a parità di lunghezza aumenta leggermente se confrontato con un conduttore unico di uguale sezione. Ciò perché i singoli fili che compongono la corda Litz sono avvolti a spirale, dunque la lunghezza che sviluppano è maggiore. Valori di resistenza espressi in ohm per 1000 *feet* per diversi tipi di filo Litz sono riportati nelle Tabella 7, Tabella 8 e

Tabella 9 in appendice. Altro inconveniente riscontrabile con l'uso del filo Litz è un peggiore coefficiente di occupazione (rapporto tra superficie del rame e superficie di ingombro), infatti aumentano gli interstizi tra filo e filo.

Le illustrazioni riportate in appendice mostrano diverse possibilità di assemblaggio della corda di conduttori con cui vengono realizzati i fili Litz, in particolare si nota come esista anche un assemblaggio con sezione rettangolare (tipo 7 e 8), ottimizzato come coefficiente di occupazione di spazio per i secondari a bassa tensione ed alta corrente.

| Frequenza KHz | Conduttore in Cu | |
|---|---|---|
| | # AWG | Diametro mm |
| 1 .. 10 | 22 | 0,643 |
| 10 .. 20 | 25 | 0,455 |
| 20 .. 50 | 29 | 0.287 |
| 50 .. 100 | 32 | 0.203 |
| 100 .. 200 | 35 | 0,142 |
| 200 .. 500 | 39 | 0,089 |

**Tabella 5 - Calibro massimo del conduttore pieno in rame, a diverse frequenze, dove l'aumento delle perdite per effetto pelle =>0,1%.**

Nella Tabella 5 vengono riportate le dimensioni massime di conduttori singoli in rame pieno per diverse frequenze, affinché l'aumento di resistenza, dunque le perdite, per effetto pelle siano minori dell'uno per mille. Per fili Litz i costruttori forniscono delle tabelle di valori consigliati con le dimensioni dei singoli fili assai più piccoli di quella sopra riportata (vedi Tabella 6).

# 6. Completiamo il progetto del trasformatore per *Flyback*

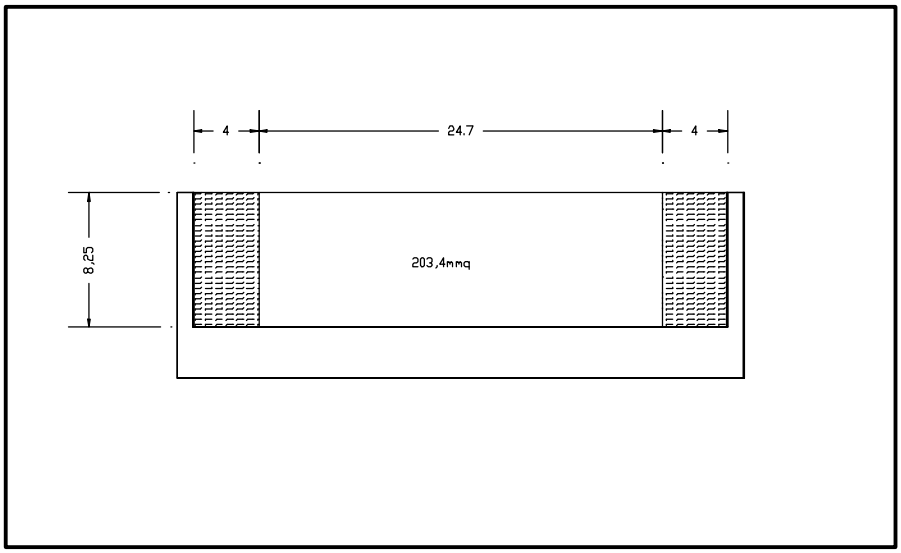



**Figura 9 - Particolare della sezione del supporto per ETD49.**

Dopo le considerazioni precedentemente fatte completiamo il progetto del trasformatore per convertitore *Flyback* descritto nel capitolo 3. Nella Figura 9 è mostrato un particolare della sezione del supporto per ETD49 con le relative dimensioni in millimetri. Considerato che le norme [9] ci richiedono una distanza minima laterale tra gli avvolgimenti primari e secondari di 8 millimetri, l'area disponibile per effettuare l'avvolgimento non sarà più quella indicata a catalogo di 269,4mm$^2$, bensì di 203,4mm$^2$. Correggendo il valore della sezione di area usabile nelle (0.24) (0.25), otteniamo:

$$A_{Cu-prim} = \frac{0,5 \cdot 203,4 \cdot 0,25}{29} = 0,877\,mm^2$$

$$A_{Cu-\sec} = \frac{0,5 \cdot 203,4 \cdot 0,25}{4} = 6,36\,mm^2$$

### *Primario.*

Con la nuova sezione al primario di 0,877mm$^2$ il valore più prossimo ricavato dalla Tabella 10 risulta essere un filo di sezione 0,823mm$^2$ (AWG18) ed un diametro nominale di 1,024mm. Dal grafico riportato in Figura 8 si osserva che se si utilizzasse un unico conduttore l'aumento della resistenza per l'effetto pelle sarebbe maggiore del 5%, quindi eccessivo. Pertanto seguendo le indicazione fornite dalla Tabella 9 in appendice, viene scelto un filo Litz equivalente come sezione cioè:

**18AWG – con diametro nominale di 61*mils* (circa 1,55mm), resistenza 7,10W/1000 *feet* , composto da 100 fili elementari 38AWG.**

Avendo a disposizione nel supporto uno sviluppo lineare di 24,7mm, su uno strato potremmo accomodare

$$n = \frac{24,7}{1,55} = 15,9 \quad spire$$

dunque realizzeremo il primario in due strati, tra cui interporremo il secondario. Per realizzare gli avvolgimenti i più simmetrici possibili, le 29 spire complessive saranno suddivise in numero di 15 sullo strato più interno, e 14 su quello esterno. Mantenendo il valore riportato nel manuale di lunghezza media della spira di 86mm per il supporto in uso, stimiamo una lunghezza totale del primario di

$$L_{prim} = 86 \cdot 29 \approx 2,5m$$

Visto il valore di resistenza 7,10Ω/1000 *feet*, cioè circa 23,3mΩ/m (1 *feet* = 30,48 cm), la resistenza dell'avvolgimento primario sarà

$$R_{\mathrm{Prim}(100°C)} = 23,3m\Omega / m \cdot 2,5m \cdot \left(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 80°C\right) \approx 78m\Omega$$

trascurando le perdite per effetto prossimità possiamo stimare le perdite nel rame al primario

$$P_{Cu_\mathrm{Prim}} = R_{\mathrm{Prim}(100°C)} \cdot I^2_{\mathrm{Prim}_rms} = 78m\Omega \cdot 5^2 A = 2W$$

## *Secondario.*

Con la nuova sezione al secondario di 6,36mm$^2$ il valore più prossimo ricavato dalla Tabella 10 in appendice risulterebbe il 9AWG con 6,63mm$^2$ di sezione, ma il filo Litz non viene prodotto per tutti i calibri. Infatti dalla Tabella 9 possiamo verificare che sono presenti solo i numeri AWG pari, dunque viene scelto il calibro successivo equivalente ad una sezione di 8,37mm$^2$ cioè:

**8AWG – con diametro nominale di 189*mils* (circa 4,8mm), resistenza 0,692W/1000 *feet* , composto da 1050 fili elementari 38AWG.**

Il secondario, di sole 4 spire, avrà uno sviluppo lineare modesto ( circa 20mm) tale da consentirne la realizzazione su un unico strato, per una lunghezza complessiva dell'avvolgimento di

$$L_{\mathrm{sec}} = 86 \cdot 4 \approx 0,344m$$

Visto il valore di resistenza 0,692Ω/1000 *feet*, cioè circa 2,27mΩ/m, la resistenza dell'avvolgimento secondario sarà

$$R_{Sec(100°C)} = 2,27m\Omega / m \cdot 0,344m \cdot \left(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 80°C\right) \approx 1m\Omega$$

trascurando le perdite per effetto prossimità possiamo stimare le perdite nel rame al primario

$$P_{Cu_Sec} = R_{Sec(100°C)} \cdot I^2_{Sec} = 1m\Omega \cdot 15^2 A = 0,24W$$

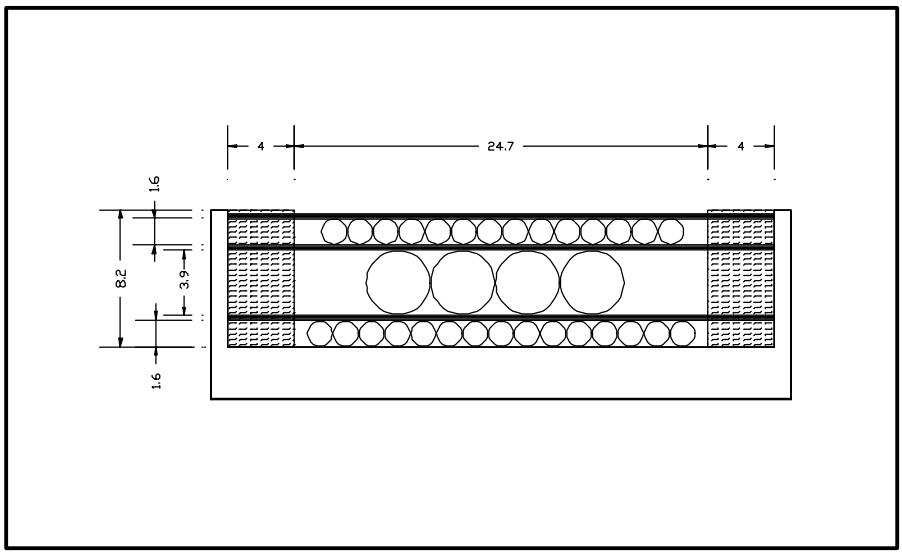



**Figura 10 - Particolare della sezione del supporto per ETD49, con la possibile stratificazione degli avvolgimenti separati da strati isolanti.**

Nella Figura 10 è possibile osservare una possibile realizzazione del trasformatore con gli stati isolanti interposti tra gli avvolgimenti. Anche se graficamente non indicato è possibile inserire anche schermi elettrostatici tra gli avvolgimenti.

## *Conclusioni*

Da una rilettura dei paragrafi precedenti possiamo vedere come le potenze dissipate dalle resistenze degli avvolgimenti non sono equivalenti, 2W circa persi al primario e 0,3W circa al secondario. Si potrebbe tentare di bilanciare le perdite utilizzando una sezione maggiore al primario e di conseguenza riducendola al secondario.

Utilizzando però un filo 16AWG al primario, l'incremento di diametro sarebbe tale da non consentire più di effettuare l'avvolgimento su due strati. Ciò, se da un lato porterebbe benefici sotto il profilo di riscaldamento dell'avvolgimento primario, compensati comunque da un aumento delle perdite al secondario forzatamente realizzato con filo di dimensioni inferiori, sicuramente aumenterebbe il valore di induttanza parassita per la asimmetria degli avvolgimenti, tanto da non giustificare l'ipotesi fatta.

Nel caso di difficoltà di realizzazione per carenze di spazio è possibile ridurre il calibro del filo al secondario. Utilizzando un 10AWG (5,26mm$^2$) la potenza massima dissipata al secondario sale a circa 0,4W. La somma della potenza persa nel rame rimane comunque minore (2W + 0,4W) della massima consentita valutata in 2,5W.

# 7.Appendice

| Frequency KHz | Wire gauge AWG | Nominal diameter inch | DC resistence max W/1000 feet |
|---|---|---|---|
| 1 .. 10 | 30 | 0.0100 | 105.82 |
| 10 .. 20 | 33 | 0.0071 | 211.70 |
| 20 .. 50 | 36 | 0.0050 | 431.90 |
| 50 ..100 | 38 | 0.0040 | 681.90 |
| 100 .. 200 | 40 | 0.0031 | 1152.30 |
| 200 .. 350 | 42 | 0.0025 | 1801.0 |
| 350 .. 850 | 44 | 0.0020 | 2873.0 |

**Tabella 6 - Dimensioni massime consigliate del singolo conduttore in un filo Litz in funzione della frequenza - New England Electric Wire Co. -**

**Nota:** per le tabelle che seguono, dove non diversamente indicato le dimensioni sono in ***inch*** (25,4mm), il valore della resistenza in continua è espresso in ohm/1000 ***feet*** (30,48cm), nelle colonne ***Construction*** interpretare [**z** x]**y/w** come **w:** calibro AWG del singolo conduttore, **y**: numero di conduttori elementari; **z** come numero di fasci. Ad esempio: 5x70/33 significa filo Litz realizzato con 5 fasci composti da 70 fili calibro 33AWG. Vedi anche Figura 11.
**SN** = single nylon serving, **DN** = double nylon serving, **SNB** = single nylon braid, **PVC** = extruded polyvinylchloride

| Equivalent AWG | Circular Mil Area | Number of Strands | Strand Gauge | Film Coating | Constrution Type | Outer Isolation | Nominal O.D. | Direct Current Resistence | Constrution |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 26 | 303 | 6 | 33 | S | 1 | SN | .025 | 35.8 | 6/33 |
| 24 | 403 | 8 | 33 | S | 1 | -- | .025 | 26.9 | 8/33 |
| 22 | 655 | 13 | 33 | S | 1 | SN | .035 | 16.6 | 13/33 |
| 20 | 1,059 | 21 | 33 | S | 1 | SN | .044 | 10.3 | 21/33 |
| 18 | 1,613 | 32 | 33 | S | 1 | SN | .054 | 6.71 | 32/33 |
| 16 | 2,672 | 53 | 33 | S | 1 | SN | .066 | 4.05 | 53/33 |
| 14 | 5,041 | 100 | 33 | S | 2 | SN | .099 | 2.20 | 5x20/33 |
| 12 | 7,562 | 150 | 33 | S | 2 | SN | .121 | 1.47 | 5x30/33 |
| 10 | 10,586 | 210 | 33 | S | 2 | SN | .144 | 1.05 | 3x70/33 |
| 8 | 16,585 | 329 | 33 | S | 2 | DN | .183 | .669 | 7x47/33 |
| 6 | 26,465 | 525 | 33 | S | 2 | DN | .230 | .430 | 5x3x35/33 |
| 4 | 42,849 | 850 | 33 | S | 2 | DN | .292 | .265 | 5x5x34/33 |
| 2 | 66,541 | 1,320 | 33 | S | 5 | SNB | .484 | .171 | 6(5x44/33) |
| 1 | 90,738 | 1,800 | 33 | S | 5 | SNB | .558 | .127 | 6(3/5/20/33) |
| 1/0 | 105,861 | 2,100 | 33 | S | 5 | SNB | .600 | .107 | 6(5/70/33) |
| 2/0 | 136,107 | 2,700 | 33 | S | 5 | SNB | .675 | .084 | 6(5x3/30/33) |
| 3/0 | 169,377 | 3,360 | 33 | S | 5 | SNB | .850 | .067 | 12(5x56/33) |
| 4/0 | 211,772 | 4,200 | 33 | S | 5 | SNB | .987 | .054 | 14(5x3/20/33) |
| -- | 299,435 | 5,940 | 33 | S | 6 | PVC | 1.29 | .038 | 6(6(5/33/33)) |
| -- | 512,972 | 10,176 | 33 | S | 6 | PVC | 1.80 | .022 | 8(6(4x53/33)) |
| -- | 725,904 | 14,400 | 33 | S | 6 | PVC | 2.42 | .016 | 15(6(5x32/33)) |
| -- | 917,462 | 18,200 | 33 | S | 6 | PVC | 3.12 | .012 | 20(13(70/33)) |
| -- | 1,572,792 | 31,200 | 33 | S | 6 | PVC | 3.99 | .007 | 20(6(5/52/33)) |

**Tabella 7 - Fili Litz consigliati per frequenze 10KHz-20KHz - New England Electric Wire Co. -**

| Equivalent AWG | Circular Mil Area | Number of Strands | Strand Gauge | Film Coating | Constrution Type | Outer Isolation | Nominal O.D. | Direct Current Resistence | Constrution |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 100 | 4 | 36 | S | 1 | -- | .013 | 109.6 | 4/36 |
| 28 | 175 | 7 | 36 | S | 1 | -- | .017 | 62.7 | 7/36 |
| 26 | 250 | 10 | 36 | S | 1 | SN | .024 | 43.9 | 10/36 |
| 24 | 400 | 16 | 36 | S | 1 | SN | .029 | 27.4 | 16/36 |
| 22 | 675 | 27 | 36 | S | 1 | SN | .037 | 16.3 | 27/36 |
| 20 | 1,025 | 41 | 36 | S | 1 | SN | .045 | 10.7 | 41/36 |
| 18 | 1,625 | 65 | 36 | S | 2 | SN | .061 | 6.91 | 5x13/36 |
| 16 | 2,625 | 105 | 36 | S | 2 | SN | .073 | 4.26 | 3x35/36 |
| 14 | 4,125 | 165 | 36 | S | 2 | SN | .091 | 2.72 | 5x33/36 |
| 12 | 6,625 | 265 | 36 | S | 2 | SN | .116 | 1.70 | 5x53/36 |
| 10 | 10,500 | 420 | 36 | S | 2 | DN | .149 | 1.10 | 5x3x28/36 |
| 8 | 16,500 | 660 | 36 | S | 2 | DN | .186 | .697 | 5x3x44/36 |
| 6 | 26,250 | 1,050 | 36 | S | 2 | DN | .234 | .438 | 5x5x42/36 |
| 4 | 45,000 | 1,800 | 36 | S | 2 | DN | .305 | .255 | 5x5x72/36 |
| 2 | 66,500 | 2,660 | 36 | S | 2 | DN | .370 | .173 | 7x5x76/36 |
| 1 | 84,000 | 3,360 | 36 | S | 5 | SNB | .548 | .140 | 6(5x4x28/36) |
| 1/0 | 108,000 | 4,320 | 36 | S | 5 | SNB | .655 | .109 | 9(5x3x32/36) |
| 2/0 | 135,000 | 5,400 | 36 | S | 5 | SNB | .728 | .087 | 9(5x3x40/36) |
| 3/0 | 171,000 | 6,840 | 36 | S | 5 | SNB | .870 | .069 | 12(5x3x38/36) |
| 4/0 | 211,500 | 8,460 | 36 | S | 5 | SNB | .962 | .055 | 12(5x3x47/36) |

**Tabella 8 - Fili Litz consigliati per frequenze 20KHz-50KHz - New England Electric Wire Co.**

| Equivalent AWG | Circular Mil Area | Number of Strands | Strand Gauge | Film Coating | Constrution Type | Outer Isolation | Nominal O.D. | Direct Current Resistence | Constrution |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 112 | 7 | 38 | S | 1 | SN | .017 | 98.9 | 7/38 |
| 28 | 160 | 10 | 38 | S | 1 | SN | .020 | 69.3 | 10/38 |
| 26 | 256 | 16 | 38 | S | 1 | SN | .024 | 43.3 | 16/38 |
| 24 | 400 | 25 | 38 | S | 1 | SN | .029 | 27.7 | 25/38 |
| 22 | 640 | 40 | 38 | S | 1 | SN | .036 | 17.4 | 40/38 |
| 20 | 1,056 | 66 | 38 | S | 1 | SN | .050 | 10.8 | 3/22/38 |
| 18 | 1,600 | 100 | 38 | S | 2 | SN | .061 | 7.10 | 5x20/38 |
| 16 | 2,592 | 162 | 38 | S | 2 | SN | .073 | 4.38 | 3/54/38 |
| 14 | 4,160 | 260 | 38 | S | 2 | SN | .093 | 2.73 | 5x52/38 |
| 12 | 6,720 | 420 | 38 | S | 2 | SN | .118 | 1.73 | 5x3/28/38 |
| 10 | 10,560 | 660 | 38 | S | 2 | DN | .150 | 1.11 | 5x3/44/38 |
| 8 | 16,800 | 1,050 | 38 | S | 2 | DN | .189 | .692 | 5x5x42/38 |
| 6 | 26,400 | 1,650 | 38 | S | 2 | DN | .236 | .440 | 5x5x66/38 |
| 4 | 42,000 | 2,625 | 38 | S | 2 | DN | .296 | .283 | 5x5x3/35/38 |
| 2 | 66,240 | 4,140 | 38 | S | 5 | SNB | .494 | .180 | 6(5x3/46/38) |
| 1 | 84,000 | 5,250 | 38 | S | 5 | SNB | .551 | .141 | 6(5x5x35/38) |
| 1/0 | 105,600 | 6,600 | 38 | S | 5 | SNB | .613 | .112 | 6(5x5x44/38) |
| 2/0 | 136,000 | 8,500 | 38 | S | 5 | SNB | .749 | .087 | 10(5x5x34/38) |
| 3/0 | 168,000 | 10,500 | 38 | S | 5 | SNB | .828 | .070 | 10(5x5x42/38) |
| 4/0 | 211,200 | 13,200 | 38 | S | 5 | SNB | .966 | .056 | 12(5x5x44/38) |

**Tabella 9 - Fili Litz consigliati per frequenze 50KHz-100KHz - New England Electric Wire Co.**

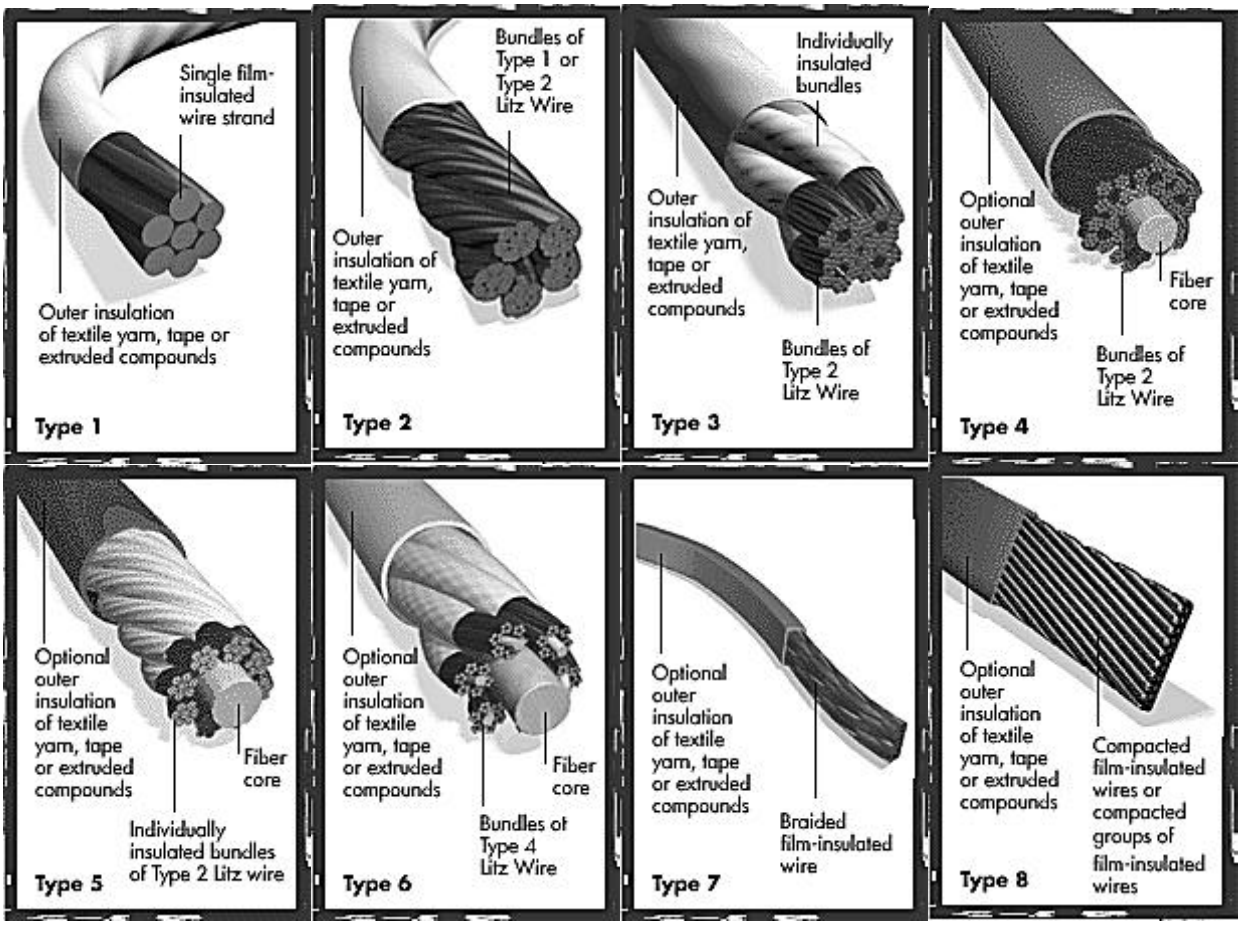



**Figura 11 - Constrution type - New England Electric Wire Co**

| AWG Size | Conduttore | | | | Isolamento | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diametro mm | | | Sezione $mm^2$ | Singolo | | Doppio | |
| | | | | | Aumento Diametro mm | | Aumento Diametro mm | |
| | Nom | Min | Max | Nom | Min | Max | Min | Max |
| 52 | 0,020 | --- | --- | 0,0003 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,030 |
| 51 | 0,022 | --- | --- | 0,0004 | 0,003 | 0,028 | 0,005 | 0,033 |
| 50 | 0,025 | --- | --- | 0,0005 | 0,003 | 0,030 | 0,005 | 0,036 |
| 49 | 0,028 | --- | --- | 0,0006 | 0,003 | 0,033 | 0,005 | 0,038 |
| 48 | 0,031 | --- | --- | 0,0008 | 0,003 | 0,038 | 0,005 | 0,043 |
| 47 | 0,036 | --- | --- | 0,0010 | 0,003 | 0,043 | 0,008 | 0,048 |
| 46 | 0,040 | --- | --- | 0,0013 | 0,003 | 0,047 | 0,008 | 0,053 |
| 45 | 0,045 | --- | --- | 0,0016 | 0,003 | 0,052 | 0,008 | 0,058 |
| 44 | 0,051 | 0,048 | 0,053 | 0,0020 | 0,003 | 0,061 | 0,010 | 0,069 |
| 43 | 0,056 | 0,053 | 0,058 | 0,0025 | 0,005 | 0,066 | 0,010 | 0,074 |
| 42 | 0,064 | 0,061 | 0,066 | 0,0032 | 0,005 | 0,076 | 0,010 | 0,081 |
| 41 | 0,071 | 0,069 | 0,074 | 0,0040 | 0,005 | 0,084 | 0,013 | 0,091 |
| 40 | 0,079 | 0,076 | 0,081 | 0,0049 | 0,005 | 0,094 | 0,015 | 0,102 |
| 39 | 0,089 | 0,086 | 0,091 | 0,0062 | 0,005 | 0,104 | 0,015 | 0,114 |
| 38 | 0,102 | 0,099 | 0,104 | 0,0082 | 0,008 | 0,119 | 0,018 | 0,130 |
| 37 | 0,114 | 0,112 | 0,117 | 0,0102 | 0,008 | 0,132 | 0,020 | 0,145 |
| 36 | 0,127 | 0,124 | 0,130 | 0,0127 | 0,010 | 0,147 | 0,020 | 0,160 |
| 35 | 0,142 | 0,140 | 0,145 | 0,0158 | 0,010 | 0,163 | 0,023 | 0,178 |
| 34 | 0,160 | 0,157 | 0,163 | 0,0201 | 0,013 | 0,183 | 0,025 | 0,198 |
| 33 | 0,180 | 0,178 | 0,183 | 0,0254 | 0,013 | 0,206 | 0,028 | 0,224 |
| 32 | 0,203 | 0,201 | 0,206 | 0,0324 | 0,015 | 0,231 | 0,030 | 0,249 |
| 31 | 0,226 | 0,224 | 0,229 | 0,0401 | 0,015 | 0,254 | 0,033 | 0,274 |
| 30 | 0,254 | 0,251 | 0,257 | 0,0507 | 0,018 | 0,284 | 0,036 | 0,302 |
| 29 | 0,287 | 0,284 | 0,290 | 0,0647 | 0,018 | 0,320 | 0,038 | 0,338 |
| 28 | 0,320 | 0,318 | 0,323 | 0,0804 | 0,020 | 0,356 | 0,041 | 0,373 |
| 27 | 0,361 | 0,358 | 0,363 | 0,1024 | 0,020 | 0,396 | 0,041 | 0,417 |
| 26 | 0,404 | 0,399 | 0,406 | 0,1282 | 0,023 | 0,439 | 0,043 | 0,462 |
| 25 | 0,455 | 0,450 | 0,457 | 0,1626 | 0,023 | 0,493 | 0,046 | 0,516 |
| 24 | 0,511 | 0,505 | 0,513 | 0,2051 | 0,025 | 0,551 | 0,048 | 0,577 |
| 23 | 0,574 | 0,569 | 0,577 | 0,2588 | 0,025 | 0,617 | 0,051 | 0,643 |
| 22 | 0,643 | 0,635 | 0,645 | 0,3247 | 0,028 | 0,686 | 0,053 | 0,714 |
| 21 | 0,724 | 0,716 | 0,726 | 0,4117 | 0,028 | 0,770 | 0,056 | 0,798 |
| 20 | 0,813 | 0,805 | 0,818 | 0,5191 | 0,030 | 0,861 | 0,058 | 0,892 |
| 19 | 0,912 | 0,902 | 0,917 | 0,6532 | 0,030 | 0,963 | 0,064 | 0,993 |
| 18 | 1,024 | 1,013 | 1,029 | 0,8235 | 0,033 | 1,077 | 0,066 | 1,110 |
| 17 | 1,151 | 1,138 | 1,156 | 1,0405 | 0,036 | 1,207 | 0,071 | 1,240 |
| 16 | 1,290 | 1,278 | 1,298 | 1,3069 | 0,036 | 1,349 | 0,074 | 1,384 |
| 15 | 1,450 | 1,435 | 1,458 | 1,6513 | 0,038 | 1,509 | 0,076 | 1,547 |
| 14 | 1,628 | 1,613 | 1,636 | 2,0816 | 0,041 | 1,692 | 0,081 | 1,732 |
| 13 | 1,829 | 1,811 | 1,839 | 2,6273 | --- | --- | 0,071 | 1,923 |
| 12 | 2,052 | 2,032 | 2,062 | 3,3070 | --- | --- | 0,074 | 2,151 |
| 11 | 2,304 | 2,281 | 2,316 | 4,1691 | --- | --- | 0,076 | 2,408 |
| 10 | 2,588 | 2,563 | 2,601 | 5,2603 | --- | --- | 0,079 | 2,695 |
| 9 | 2,906 | 2,878 | 2,921 | 6,6324 | --- | --- | 0,081 | 3,020 |
| 8 | 3,264 | 3,231 | 3,282 | 8,3672 | --- | --- | 0,084 | 2,875 |
| 7 | 3,665 | 3,630 | 3,683 | 10,549 | --- | --- | 0,086 | 3,787 |
| 6 | 4,115 | 4,074 | 4,135 | 13,299 | --- | --- | 0,089 | 4,244 |
| 5 | 4,620 | 4,575 | 4,643 | 16,763 | --- | --- | 0,091 | 4,755 |
| 4 | 5,189 | 5,138 | 5,215 | 21,146 | --- | --- | 0,094 | 5,329 |

**Tabella 10 - Dimensioni nominali, minime e massime dei conduttori di rame per isolamento singolo e doppio o rinforzato - PIREMAG.**

# 8.Bibliografia

1. Ferrites and Accessories, Siemens Matsushita Components
2. Soft Ferrites – Data Handbook, Philips Components
3. O. Kilgenstein, Switched-mode Power Supplies in Pratice, John Wiley & Sons
4. H.W. Whittington, B.W. Flaynn, D.E. Macpherson, Switched mode power Supplies, John Wiley & Sons
5. R. Martinelli, C.Hymowitz, Magnetic Design and Modelling, Power Specialit's
6. Intusoft, Magnetic Designer, Intusoft, 1997
7. M. Pezzi, Campi elettrici, magnetici e circuiti, Zanichelli Bologna
8. S. Ramo, J.R. Whinnery, T. Van Duzer, Campi e onde nell'elettronica per le comunicazioni, F. Angeli, Milano
9. Norma Tecnica CEI EN 60950, 1996-10
10. Norma Tecnica CEI EN 60950/A4, 1997-10
11. Sito WEB 135.145.4.41, New England Electric Wire Co, Technical Information
12. Sito WEB http://www.wiretron.com, Litz wire – general information
13. Sito WEB http://www.neewcweb.com , New England Electric Wire Co.
14. Sito WEB http://www.dartmounth.edu/~sullivan/litzwire/litz.html, C.R. Sullivan, Optimal Chioce for Number of Strand in a Litz-Wire Transformer Winding, PESC'97
15. Sito WEB http://www.piremag.com , Pirelli Magnetic Wire.

# Note sui trasformatori switching

di Vittorio Carboni I6DVX

Le presenti note sui trasformatori per alimentatori a commutazione fanno parte di un lavoro più organico che varrà pubblicato su WEB (http://www.micro.eealab.unian.it/Ladec/index.html) dal titolo *Guida al progetto dei trasformatori per alimentatori Flyback e Foreward*, cui rinvio per una trattazione più esaustiva.

## La ferrite

Il primo passo nel progetto del trasformatore è la scelta della ferrite come forma fisica, tipo del materiale e dimensioni. È una scelta molto importante che caratterizza tutto il progetto in quanto tutti i calcoli successivi saranno basati su di essa. Un errore di valutazione può comportare accorgersi alla fine che, ad esempio, le dimensioni non sono adatte: ciò significa ripartire dall'inizio con notevole dispendio di tempo e risorse.

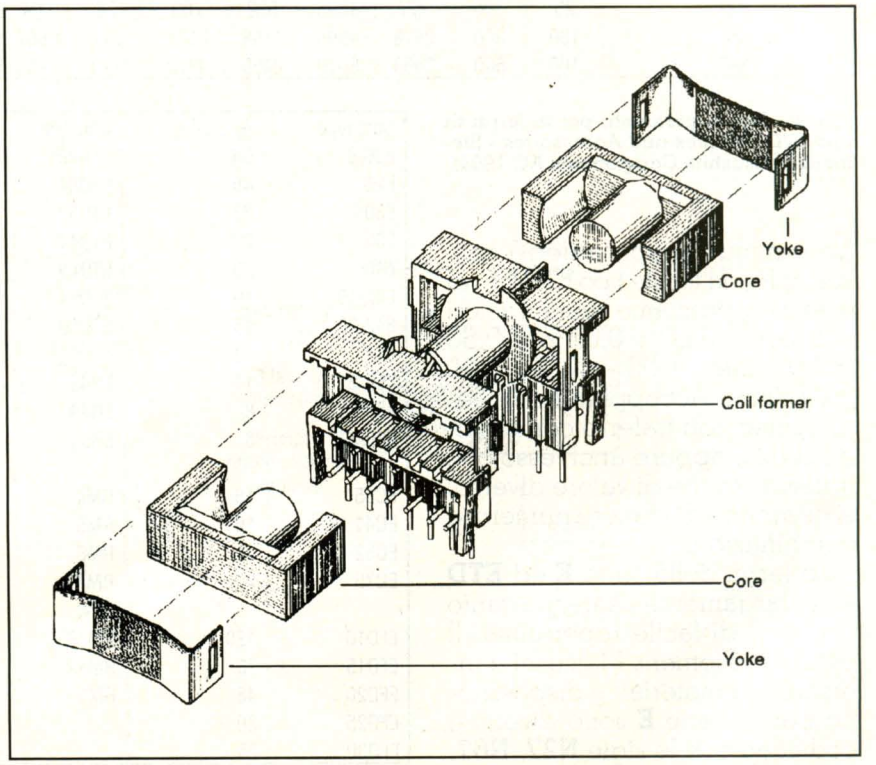
Le ferriti sono caratterizzate da perdite molto basse ad alte frequenze; esse sono realizzate con leghe di ossidi di ferro ed altri metalli come zinco e manganese. Il materiale viene polverizzato assieme ad ossidi isolanti e quindi modellato con tecniche tipiche della ceramica. Ciò consente di realizzare ferriti con grande varietà nelle forme e nelle dimensioni e con tolleranze nelle caratteristiche magnetiche e meccaniche molto ristrette. Esse, inoltre, possono essere lavorate con precisione dopo l'operazione della cottura.

Le ferriti tipicamente hanno una densità del flusso di saturazione compreso tra 3 e 5 kgauss, inoltre la presenza di ossidi ne aumenta la resistività specifica a livelli molto alti permettendo così di ridurre le perdite per correnti parassite. Le forme disponibili includono barrette, toroidi, nuclei EI EE ed UI. La temperatura di Curie $T_C$, ossia la temperatura alla quale il materiale perde ogni proprietà ferromagnetica, è compresa tra i 100 e i 300°C, a secondo del tipo di materiale; il fenomeno è reversibile: riducendo la temperatura al di sotto di $T_C$ il materiale riacquista le sue proprietà.

Per trasformatori di bassa-media potenza la serie **E** è la scelta migliore. Come la sigla lascia intuire, il nucleo magnetico è composto da due elementi a forma di **E**. I due pezzi formano il circuito magnetico, vengono infilati nel supporto degli avvolgimenti e bloccati in sede con delle mollette e/o incollate con Araldite od altri collanti epossidici. Le tre superfici di contatto dei seminuclei sono lavorate in modo da ridurre le rugosità e quindi contenere a dimensioni trascurabili il traferro (*gap*) non intenzionale. In taluni casi il traferro è voluto, ciò può essere ottenuto realizzando la colonna centrale del seminucleo più corta di quelle esterne.

È possibile scegliere da catalo-

**Fig. 1 - Esempio di assemblaggio di un kit composto dal supporto per gli avvolgimenti, una coppia di ferriti del tipo ETD ed una coppia di mollette di fissaggio (*Ferrites and Accessories* - Siemens Matsushita Components AG 1994).**



| | | | | | Power capacities | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Push-pull converter | | Single-ended converter | | Flyback converter | |
| Core shape | Material | Volume mm³ V | $f_{typ}$ kHz | $f_{cutoff}$ kHz | $P_{trans}$ ($f_{typ}$) W | $P_{trans}$ ($f_{cutoff}$) W | $P_{trans}$ ($f_{typ}$) W | $P_{trans}$ ($f_{cutoff}$) W | $P_{trans}$ ($f_{typ}$) W | $P_{trans}$ ($f_{cutoff}$) W |
| ETD29 | N59 | 32100 | 750 | 1500 | 428 | 614 | 304 | 436 | 261 | 375 |
| | N49 | | 500 | 1000 | 209 | 300 | 148 | 213 | 127 | 183 |
| | N62 | | 25 | 150 | 103 | 151 | 52 | 55 | 45 | 47 |
| | N27 | | 25 | 100 | 51 | 94 | 33 | 38 | 28 | 32 |
| | N67 | | 100 | 300 | 161 | 286 | 115 | 189 | 98 | 163 |
| | N87 | | 100 | 500 | 225 | 522 | 160 | 237 | 137 | 204 |
| ETD34 | N59 | 60200 | 750 | 1500 | 676 | 970 | 480 | 689 | 412 | 592 |
| | N49 | | 500 | 1000 | 330 | 473 | 234 | 336 | 201 | 289 |
| | N62 | | 25 | 150 | 162 | 244 | 84 | 89 | 72 | 77 |
| | N27 | | 25 | 100 | 80 | 151 | 53 | 61 | 45 | 52 |
| | N67 | | 100 | 300 | 255 | 452 | 181 | 303 | 155 | 260 |
| | N87 | | 100 | 500 | 356 | 824 | 253 | 383 | 217 | 329 |
| ETD39 | N59 | 82100 | 750 | 1500 | 1016 | 1458 | 721 | 1035 | 620 | 889 |
| | N49 | | 500 | 1000 | 495 | 711 | 352 | 505 | 302 | 434 |
| | N62 | | 25 | 150 | 244 | 409 | 139 | 152 | 120 | 130 |
| | N27 | | 25 | 100 | 120 | 241 | 84 | 102 | 72 | 88 |
| | N67 | | 100 | 300 | 383 | 680 | 272 | 478 | 234 | 410 |
| | N87 | | 100 | 500 | 535 | 1239 | 380 | 639 | 326 | 549 |
| ETD44 | N62 | 109000 | 25 | 150 | 405 | 703 | 238 | 261 | 205 | 225 |
| | N27 | | 25 | 100 | 200 | 406 | 141 | 176 | 121 | 151 |
| | N67 | | 100 | 300 | 636 | 1129 | 452 | 801 | 388 | 688 |
| | N87 | | 100 | 500 | 889 | 2059 | 631 | 1097 | 542 | 942 |
| ETD49 | N62 | 139000 | 25 | 150 | 629 | 1081 | 367 | 401 | 315 | 344 |
| | N27 | | 25 | 100 | 310 | 629 | 218 | 270 | 188 | 232 |
| | N67 | | 100 | 300 | 989 | 1754 | 702 | 1241 | 603 | 1066 |
| | N87 | | 100 | 500 | 1380 | 3197 | 980 | 1686 | 842 | 1448 |
| ETD54 | N62 | 293000 | 25 | 150 | 943 | 1700 | 573 | 635 | 492 | 545 |
| | N27 | | 25 | 100 | 411 | 845 | 292 | 376 | 251 | 323 |
| | N67 | | 100 | 300 | 1482 | 2629 | 1052 | 1871 | 904 | 1607 |
| | N87 | | 100 | 500 | 2069 | 4791 | 1469 | 2644 | 1262 | 2271 |
| ETD59 | N62 | 412000 | 25 | 150 | 1576 | 2807 | 948 | 1046 | 814 | 899 |
| | N27 | | 25 | 100 | 777 | 1595 | 552 | 703 | 474 | 604 |
| | N67 | | 100 | 300 | 2478 | 4395 | 1759 | 3127 | 1511 | 2687 |
| | N87 | | 100 | 500 | 3459 | 8010 | 2456 | 4370 | 2110 | 3754 |

**Tab. 1 - Alcuni parametri per le ferriti di tipo ETD (*Ferrites and Accessories* - Siemens Matsushita Components AG 1994)**

go seminuclei con traferro calibrato. Per la ferrite tipo ETD49, ad esempio, possiamo avere 4 valori di traferro: 0,20 ± 0,02 mm, 0,50 ±0,05 mm, 1,00 ±0,05, 2,00 ±0,05mm. Accoppiando un seminucleo con traferro con un altro senza, oppure anch'esso con traferro, anche di valore diverso, si riescono ad ottenere numerose combinazioni.

Le ferriti della serie **E** ed **ETD** sono largamente usate, pertanto risultano di facile reperibilità. Il catalogo Siemens Matsushita indica che i materiali a disposizione per la serie **E** sono diversi e codificati con le sigle **N27**, **N67**, **N87**, **N49**, **N30**, **T37**. La scelta del materiale da usare è correlata con la frequenza di commutazione: il tipo **N27** è adatto per applicazioni di potenza in un banda di frequenza di commutazione sino a 100 kHz, **N67** è idoneo per analoghe applicazione ma la gamma di frequenza è compresa tra 100 kHz ed i 300 kHz. La tabella 1 indica le possibili applicazioni per i diversi materiali. La serie **E** classica ha la colonna centrale quadrata, altre famiglie della stessa serie sono disponibili per applicazioni particolari, ad

| Material | $\Delta T_{max}$ °C | $f_{typ}$ kHz | $f_{cutoff}$ kHz |
|---|---|---|---|
| N59 | 30 | 750 | 1500 |
| N49 | 20 | 500 | 100 |
| N62 | 40 | 25 | 150 |
| N27 | 30 | 25 | 100 |
| N67 | 40 | 100 | 300 |
| N87 | 50 | 100 | 500 |
| N72 | 40 | 25 | 150 |
| N41 | 30 | 25 | 100 |
| N61 | 30 | 25 | 150 |

**Tab.2 - Massimo incremento della temperatura ammesso per i diversi materiali (*Ferrites and Accessories* - Siemens Matsushita Components AG 1994)**

**Tab. 3 - Resistenza termica per diversi tipi e dimensioni di ferriti (*Ferrites and Accessories* - Siemens Matsushita Components AG 1994)**

| Core type | $R_{th}$ (°C/W) | Core type | $R_{th}$ (°C/W) | Core type | $R_{th}$ (°C/W) |
|---|---|---|---|---|---|
| E20/6 | 50 | ETD29 | 28 | PM50/39 | 15 |
| E25 | 40 | ETD34 | 20 | PM62/49 | 12 |
| E30/7 | 23 | ETD39 | 16 | PM74/59 | 9.5 |
| E32 | 22 | ETD44 | 11 | PM87/70 | 8 |
| E40 | 20 | ETD49 | 8 | PM114/93 | 6 |
| E42/15 | 19 | ETD54 | 6 | | |
| E42/20 | 15 | ETD59 | 4 | U11 | 46 |
| E47 | 13 | | | U15 | 35 |
| E55/21 | 11 | ER42 | 12 | U17 | 30 |
| E55/25 | 8 | ER49 | 9 | U20 | 24 |
| E65/27 | 6 | ER54 | 11 | U21 | 22 |
| | | | | U25 | 15 |
| EC35 | 18 | RM4 | 120 | U26 | 13 |
| EC41 | 15 | RM5 | 100 | U30 | 4 |
| EC52 | 11 | RM6 | 80 | U93/20 | 1.7 |
| EC70 | 7 | RM7 | 68 | U93/30 | 1.2 |
| | | RM8 | 57 | UI93 | 5 |
| EFD10 | 120 | RM10 | 40 | UU93 | 4 |
| EFD15 | 75 | RM12 | 25 | | |
| EFD20 | 45 | RM14 | 18 | | |
| EFD25 | 30 | | | | |
| EFD30 | 25 | | | | |

esempio le più note:

- **ETD** acronimo di Economic Transformer Design, con sezione circolare della colonna centrale
- **EFD** acronimo di Economic Flat transformer Design per applicazioni con ingombri verticali contenuti.

I parametri più importanti per una corretta scelta della ferrite sono:

1. Potenza massima ($P_{trans}$)
2. Tipologia del convertitore (Forward, Flyback, Push-Pull )
3. Frequenza di commutazione e massima sovratemperatura ammessa
4. Volume massimo

Per effettuare la scelta è bene considerare che il costruttore, di norma, indica sempre dei valori ***limite***, dunque se non è stringente il problema dei costi, è buona regola scegliere il tipo immediatamente superiore a quello che da tabella eroga la potenza richiesta. Si eviterà poi, in fase di avvolgimento, di scoprire che il numero di spire calcolato, con il filo di sezione calcolata, non entri per carenza di spazio nella gola del supporto degli avvolgimenti. Questa precauzione è tanto più consigliata se il trasformatore deve essere avvolto nel rispetto delle norme di sicurezza (distanze minime tra i diversi strati degli avvolgimenti, uso di fili con doppio isolamento ecc.).

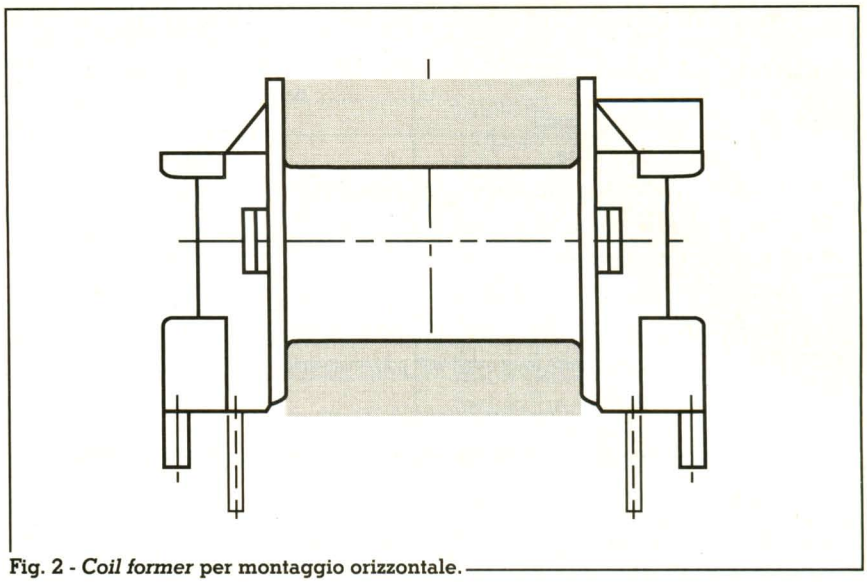
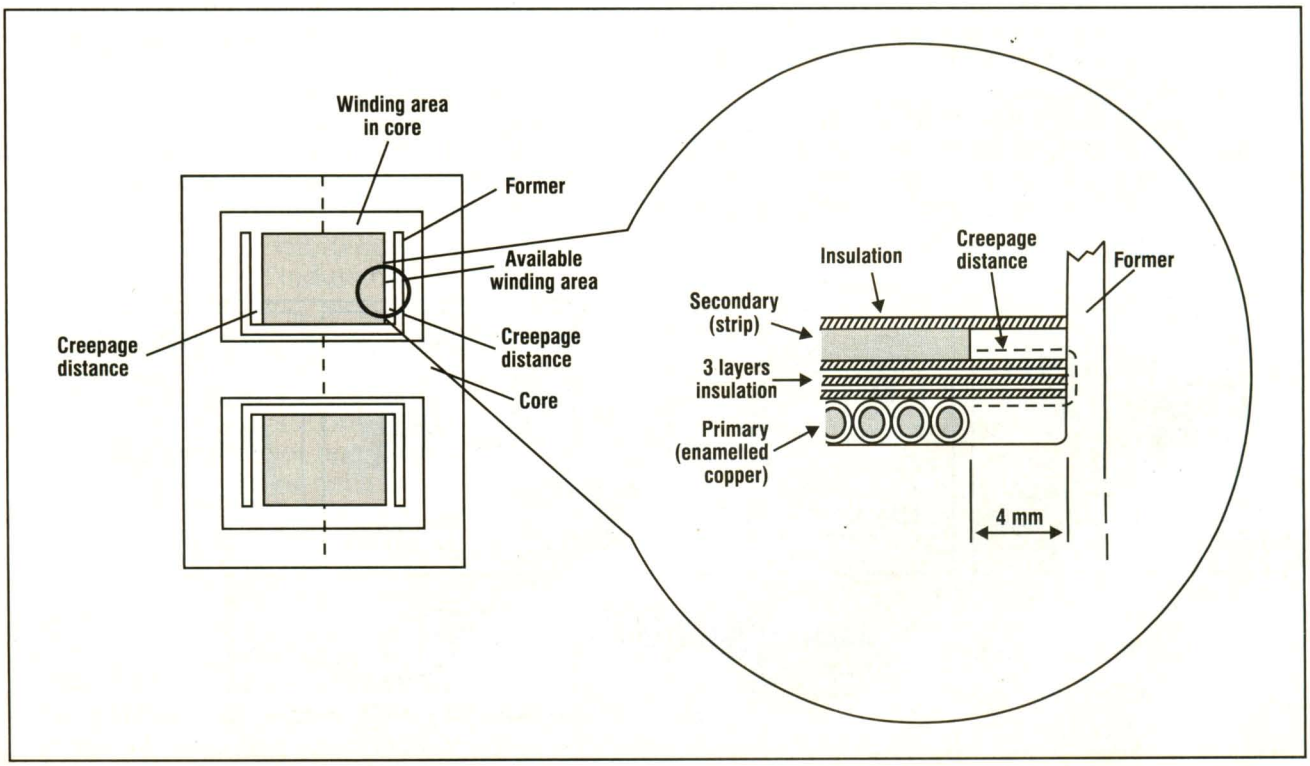


**Fig. 2 - *Coil former* per montaggio orizzontale.**

## Supporti, isolamenti e fili

Normalmente ad ogni tipo di ferrite è associato un supporto (*coil former*) ben preciso individuabile da catalogo. Essi sono normalmente realizzati con materiale plastico (phenolformaldehyde PH[2], polyterephthalate GFR[1]). Si presentano di solito con un'unica gola su cui vengono effettuati gli avvolgimenti del primario e del/i secondario/i. Dei piedini metallici (*pins*) per-

**Fig. 3 - Rappresentazione schematica della sezione di un trasformatore con particolare della *creepage distance* (Soft Ferrites – Data Handbook, Philips Components).**



| | | Availability | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Product name** | **Insulation** | **Conductor** | **Rd** | **Sq & Rect** | **Thermal Class** | **UL Listed** | **NEMA Number** |
| PIREFORM | Polyvinyl formal | Copper | • | • | 105 | • | MW 15-C, 8-C |
| PIRESOLD | Polyurethane | Copper | • | | 130/155 | • | MW 75-C/79-C |
| PIRESOLD NY | Polyurethane overcoated with polyamide | Copper | • | | 130/155 | • | MW 28-C/80-C |
| PIRETERM | Polyesterimide(hermetics) | Copper | • | | 180 | • | MW 72-C |
| PIRETERM W | Polyesterimide | Copper | • | • | 180 | • | MW 30-C |
| PIRETERM SD | Solderable Polyesterimide | Copper | • | | 180 | • | MW 77-C |
| PIRETERM_NY_SD | Solderable Polyesterimide overcoated w/polyamide | Copper | • | | 180 | • | MW 78-C |
| POLITERM | Polyesterimide overcoated with polyamide-imide | Copper | • | • | 200 | • | MW 35-C/73-C, 36C |
| POLITEMP | Polyimide | Copper | • | • | 200 | | MW_16-C/71-C, 20-C |

**Tabella 4 - Dimerse tipologie di conduttori smaltati per avvolgimenti della PIREMAG.**

mettono sia l'ancoraggio dei fili degli avvolgimenti, sia la connessione meccanica ed elettrica del trasformatore alla scheda.

È possibile scegliere il supporto a montaggio verticale, direzione verso cui si sviluppa prevalentemente l'ingombro, o il supporto a montaggio orizzontale. Nella fig. 2 è riportato il disegno di un supporto a montaggio orizzontale, l'area in grigio rappresenta la sezione teorica a disposizione per gli avvolgimenti, ma vedremo in seguito che ciò è vero solo per applicazioni a bassa tensione. Sempre dal catalogo è possibile ricavare, oltre alle dimensioni, altri parametri relativi al supporto come l'area disponibile per gli avvolgimenti $A_N$ e la lunghezza media di una spira $l_N$.

Nelle applicazioni dove il primario del trasformatore è direttamente connesso alla rete la norma EN60950 impone il rispetto di distanze minime tra gli avvolgimenti[(2)(4)(9)(10)]. Viene definita come *creepage distance* il percorso più breve di superficie tra due diversi circuiti elettrici. Nelle applicazioni con primario connesso alla rete 230 Vac (≈325 Vcc), il valore della distanza superficiale minima è di 4mm, per l'isolamento normale, mentre per l'isolamento rinforzato si raddoppia il valore, quindi 8 mm.

Dunque nella realizzazione degli avvolgimenti, non sarà possibile sfruttare tutta la larghezza del supporto, ma dovranno essere lasciati dei margini laterali di 4 mm, per l'isolamento rinforzato, come visibile in fig. 3.

Nella realizzazione di un trasformatore per alimentatori a commutazione oltre alle perdite nella ferrite, per l'isteresi e le correnti parassite, e a quelle nel rame, dovute alla resistenza elettrica del conduttore, esistono altri elementi che creano non pochi problemi, tra essi ricordiamo la capacità e l'induttanza parassita.

La capacità parassita si presenta tra spira e spira, tra strato e strato e soprattutto tra primario e secondari/o. È possibile studiare il fenomeno da un punto di vista analitico e ricavare il modello che descrive le capacità di accoppiamento degli avvolgimenti [6]. La necessità di ridurre gli effetti dell'accoppiamento capacitivo tra i diversi circuiti può essere affrontata con l'aggiunta di schermi elettrostatici, come mostrato in fig. 4 . In tale modo oltre a diminuire la capacità di accoppiamento tra primario e secondario, si beneficia anche della riduzione di emissioni elettromagnetiche al secondario (EMI). Gli schermi vengono realizzati avvolgendo delle strisce conduttive ,alluminio o preferibilmente

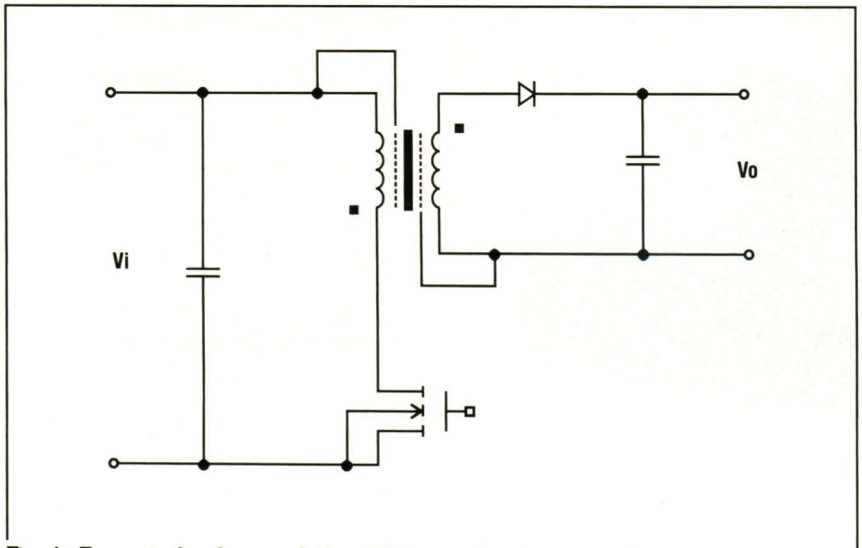



**Fig. 4 - Esempio di schermo elettrostatico tra primario e secondario.**

rame, tra gli avvolgimenti; è opportuno ricordare che essi non devono realizzare delle spire in corto, e che tra schermo ed avvolgimento è necessario assicurare l'isolamento previsto dalle norme precedentemente citate.

L'induttanza parassita viene originata dal fatto che non tutte le linee di flusso si concatenano tra primario e secondari/o, ma siamo sempre e comunque in presenza di flusso disperso, questo nonostante le geometrie dei nuclei siano studiate per ridurne l'entità. Il valore dell'induttanza parassita può essere contenuto suddividendo il primario in due o più strati ed avvolgendo il secondario in mezzo[3] [6]. Valgono sempre le considerazioni precedentemente fatte per l'isolamento tra primario e secondario. Sempre al fine di mantenere basso il valore dell'induttanza parassita è opportuno evitare, dove possibile, la realizzazione del traferro tramite l'interposizione di spessori sulle colonne esterne dei seminuclei. È preferibile usare i seminuclei appositi realizzati con la colonna centrale più corta.

Il valore dell'induttanza parassita o di dispersione può essere misurato, ciò viene effettuato misurando l'induttanza del primario con il secondario in chiuso in corto circuito, mentre per misurare l'induttanza del primario il secondario deve essere lasciato aperto. Se possibile è bene effettuare le misure alla stessa frequenza per la quale il trasformatore è stato progettato. Il rapporto tra il valore dell'induttanza parassita e l'induttanza del primario dovrebbe essere minore del 1 ÷ 2%.

I conduttori comunemente usati per trasformatori di questo tipo sono fili di rame isolato con un film plastico. Nel mondo anglosassone vengono denominati *magnet wire*, in quanto sono usati in circuiti per produrre campi magnetici (trasformatori, induttori, relè ecc.). I principali parametri che caratterizzano questi conduttori sono il calibro o diametro nominale, il tipo di isolante e/o il suo spessore, la classe termica dell'isolante ed altre caratteristiche marginali quali il colore dell'isolante, la saldabilità ecc. La tabella 4[15] mostra un elenco di nomi di famiglie di conduttori di rame smaltato, ne indica la disponibilità in sezioni rotonde o quadre/rettangolari, il limite di temperatura di funzionamento. Il numero NEMA (National Electrical Mfrs Association) è riferito ad un elenco pubblicato dalla NEMA che standardizza i calibri dei conduttori negli USA.

***(Continua)***

RIAE TELECOMUNICAZIONI srl
Via Kaolack, 5 - 11100 Aosta
Tel. 0165/363208 - Fax 0165/236724

REALIZZAZIONE ED INSTALLAZIONE
APPARECCHIATURE ELETTRONICHE

RICEVITORI, TRASMETTITORI, RIPETITORI VHF E UHF

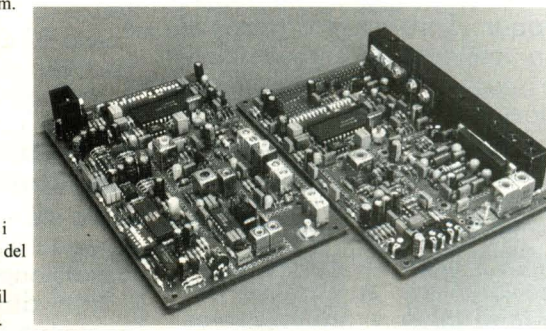
FREQUENZE RX, TX E SUB TONO (CTCSS), TUTTE IMPOSTABILI CON DIP SWITCH

RIPETITORE
- indicazioni: LED segnale in ricezione CS, LED decodifica del sub-tono TS e LED trasmissione TX;
- regolazioni: squelch e preamplificazione dei segnali di bassa frequenza lineare e con preenfasi;
- connessioni: RF tipo BNC, alimentazione e segnali di IN e OUT connettore unico tipo cannon.

TRASMETTITORE
- potenza regolabile da 0,1 a 5 W;
- assorbimento massimo 1,8 A;
- dimensione Eurocards 10x16 cm.

CARATTERISTICHE GENERALI
- alimentazione 12-15 V DC; - canalizzazione 12,5 o 25 kHz;
- PLL con passi di 12,5 kHz; - distorsione minore di 1%;
- VHF 140-175, UHF 430-470 MHz

RICEVITORE
- assorbimento 250 mA;
- sensibilità 0,3 µV per 20 dB di SINAD e 3 kHz di deviazione;
- doppia conversione, prima IF a 21,4 MHz in VHF, a 45 MHz in UHF, seconda IF a 455 kHz;
- uscite 0-5 V dritte o negate per i segnali di squelch e decodifica del tono sub-audio;
- circuito di ritenuta di serie per il pilotaggio del TX del ripetitore.



CARATTERISTICHE TECNICHE, COMPLETE E LISTINO SU NOSTRO SITO INTERNET
http://www.riae.it - e-mail: info@riae.it

# Note sui trasformatori switching

*2ª parte*

di Vittorio Carboni

Nella tab. 5 sono riportate le dimensioni nominali del fili di rame smaltato, con le variazioni minime e massime del calibro dovute al rivestimento del film isolante. I calibri dei conduttori sono indicati come AWG (American Wire Gauge) dove a numero più piccolo corrisponde filo di maggior sezione. Per effettuare la conversione tra AWG a pollici o millimetri si possono usare delle tabelle, oppure è possibile utilizzare le formule che seguono:

conversione da AWG a diametro nominale in pollici (*inch*):

$$d = 0{,}005(92)^{\frac{36-AWG}{39}}$$

conversione da AWG a millimetri:

$$d = 0{,}127(92)^{\frac{36-AWG}{39}}$$

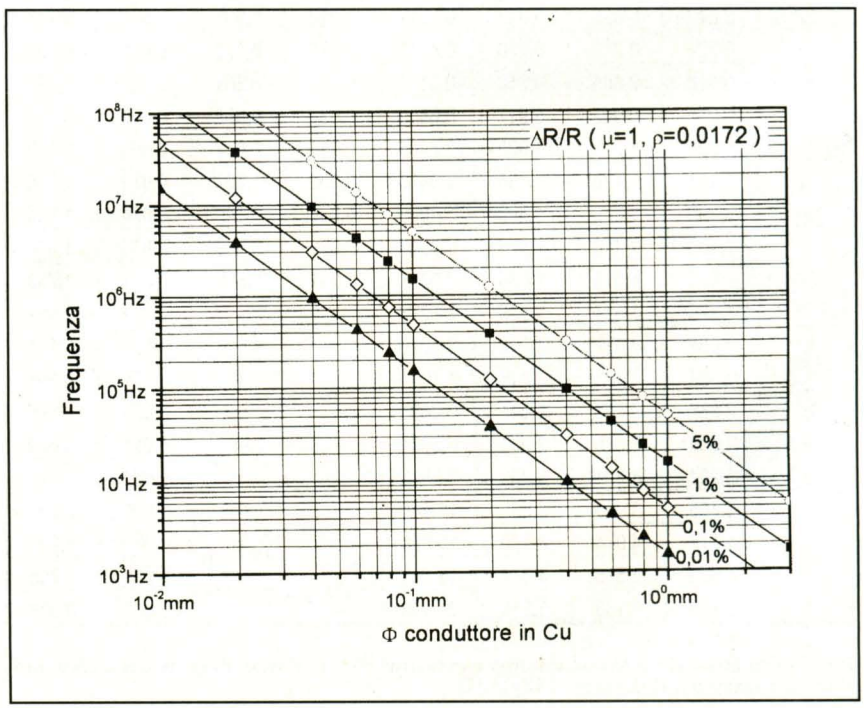
Nella determinazione delle perdite nel rame si considera la resistenza elettrica che il conduttore presenta al passaggio delle corrente. Nella stima del valore della resistenza elettrica abbiamo presunto che la corrente si distribuisca in modo uniforme su tutta la sezione del conduttore. Lavorando a frequenze relativamente elevate è ora indispensabile considerare due fenomeni, l'effetto pelle e l'effetto di prossimità. Il primo fa sí che le zone più interne del conduttore presentino una reattanza maggiore di quelle periferiche, pertanto la distribuzione della corrente nella sezione del conduttore non sarà omogenea e si avranno densità di corrente maggiori in prossimità della superficie.

L'effetto di prossimità dovuto al campo generato dai conduttori adiacenti contribuisce ulteriormente ad una distribuzione tutt'altro che uniforme della corrente. Ci troviamo nella situazione di non usare tutta la sezione del conduttore, dunque il valore calcolato di resistenza, in regime di corrente continua, dovrà essere corretto.

Una soluzione che ci consente di limitare questo fenomeno, e quindi virtualmente contenere l'aumento della resistenza, è l'utilizzo di conduttori in cui il diametro sia sufficientemente piccolo in relazione alla profondità di penetrazione della corrente, tanto da rendere l'aumento della resistenza alla frequenza di lavoro mediamente al di sotto del 1-5%.

La procedura sopra descritta per la determinazione delle perdite nel rame, non è la più precisa ma fornisce buoni risultati. Altri approcci sono possibili[14] oppure, assai più pesante da un punto di vista di calcolo[6], dove in prima istanza viene calcolato il rapporto tra il valore della resistenza dell'avvolgimento in corrente alternata in regime sinusoidale ed il valore di resistenza in corrente continua. Per valutare l'ammontare delle perdite in regime di onda quadra viene prima calcolato il valore di $R_{ac}$ poi vengono sommati i prodotti $R_{ac}*(I_n)^2$ dove $I_n$ è il valore della

**Fig. 5 - Aumento percentuale della resistenza del filo in funzione del diametro e della frequenza.**



| AWG Size | Conduttore Diametro mm | | | Sezione mm² | Isolamento Aumento Diametro mm | | Isolamento Aumento Diametro mm | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nom | Min | Max | Nom | Min | Max | Min | Max |
| 52 | 0,020 | --- | --- | 0,0003 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,030 |
| 51 | 0,022 | --- | --- | 0,0004 | 0,003 | 0,028 | 0,005 | 0,033 |
| 50 | 0,025 | --- | --- | 0,0005 | 0,003 | 0,030 | 0,005 | 0,036 |
| 49 | 0,028 | --- | --- | 0,0006 | 0,003 | 0,033 | 0,005 | 0,038 |
| 48 | 0,031 | --- | --- | 0,0008 | 0,003 | 0,038 | 0,005 | 0,043 |
| 47 | 0,036 | --- | --- | 0,0010 | 0,003 | 0,043 | 0,008 | 0,048 |
| 46 | 0,040 | --- | --- | 0,0013 | 0,003 | 0,047 | 0,008 | 0,053 |
| 45 | 0,045 | --- | --- | 0,0016 | 0,003 | 0,052 | 0,008 | 0,058 |
| 44 | 0,051 | 0,048 | 0,053 | 0,0020 | 0,003 | 0,061 | 0,010 | 0,069 |
| 43 | 0,056 | 0,053 | 0,058 | 0,0025 | 0,005 | 0,066 | 0,010 | 0,074 |
| 42 | 0,064 | 0,061 | 0,066 | 0,0032 | 0,005 | 0,076 | 0,010 | 0,081 |
| 41 | 0,071 | 0,069 | 0,074 | 0,0040 | 0,005 | 0,084 | 0,013 | 0,091 |
| 40 | 0,079 | 0,076 | 0,081 | 0,0049 | 0,005 | 0,094 | 0,015 | 0,102 |
| 39 | 0,089 | 0,086 | 0,091 | 0,0062 | 0,005 | 0,104 | 0,015 | 0,114 |
| 38 | 0,102 | 0,099 | 0,104 | 0,0082 | 0,008 | 0,119 | 0,018 | 0,130 |
| 37 | 0,114 | 0,112 | 0,117 | 0,0102 | 0,008 | 0,132 | 0,020 | 0,145 |
| 36 | 0,127 | 0,124 | 0,130 | 0,0127 | 0,010 | 0,147 | 0,020 | 0,160 |
| 35 | 0,142 | 0,140 | 0,145 | 0,0158 | 0,010 | 0,163 | 0,023 | 0,178 |
| 34 | 0,160 | 0,157 | 0,163 | 0,0201 | 0,013 | 0,183 | 0,025 | 0,198 |
| 33 | 0,180 | 0,178 | 0,183 | 0,0254 | 0,013 | 0,206 | 0,028 | 0,224 |
| 32 | 0,203 | 0,201 | 0,206 | 0,0324 | 0,015 | 0,231 | 0,030 | 0,249 |
| 31 | 0,226 | 0,224 | 0,229 | 0,0401 | 0,015 | 0,254 | 0,033 | 0,274 |
| 30 | 0,254 | 0,251 | 0,257 | 0,0507 | 0,018 | 0,284 | 0,036 | 0,302 |
| 29 | 0,287 | 0,284 | 0,290 | 0,0647 | 0,018 | 0,320 | 0,038 | 0,338 |
| 28 | 0,320 | 0,318 | 0,323 | 0,0804 | 0,020 | 0,356 | 0,041 | 0,373 |
| 27 | 0,361 | 0,358 | 0,363 | 0,1024 | 0,020 | 0,396 | 0,041 | 0,417 |
| 26 | 0,404 | 0,399 | 0,406 | 0,1282 | 0,023 | 0,439 | 0,043 | 0,462 |
| 25 | 0,455 | 0,450 | 0,457 | 0,1626 | 0,023 | 0,493 | 0,046 | 0,516 |
| 24 | 0,511 | 0,505 | 0,513 | 0,2051 | 0,025 | 0,551 | 0,048 | 0,577 |
| 23 | 0,574 | 0,569 | 0,577 | 0,2588 | 0,025 | 0,617 | 0,051 | 0,643 |
| 22 | 0,643 | 0,635 | 0,645 | 0,3247 | 0,028 | 0,686 | 0,053 | 0,714 |
| 21 | 0,724 | 0,716 | 0,726 | 0,4117 | 0,028 | 0,770 | 0,056 | 0,798 |
| 20 | 0,813 | 0,805 | 0,818 | 0,5191 | 0,030 | 0,861 | 0,058 | 0,892 |
| 19 | 0,912 | 0,902 | 0,917 | 0,6532 | 0,030 | 0,963 | 0,064 | 0,993 |
| 18 | 1,024 | 1,013 | 1,029 | 0,8235 | 0,033 | 1,077 | 0,066 | 1,110 |
| 17 | 1,151 | 1,138 | 1,156 | 1,0405 | 0,036 | 1,207 | 0,071 | 1,240 |
| 16 | 1,290 | 1,278 | 1,298 | 1,3069 | 0,036 | 1,349 | 0,074 | 1,384 |
| 15 | 1,450 | 1,435 | 1,458 | 1,6513 | 0,038 | 1,509 | 0,076 | 1,547 |
| 14 | 1,628 | 1,613 | 1,636 | 2,0816 | 0,041 | 1,692 | 0,081 | 1,732 |
| 13 | 1,829 | 1,811 | 1,839 | 2,6273 | --- | --- | 0,071 | 1,923 |
| 12 | 2,052 | 2,032 | 2,062 | 3,3070 | --- | --- | 0,074 | 2,151 |
| 11 | 2,304 | 2,281 | 2,316 | 4,1691 | --- | --- | 0,076 | 2,408 |
| 10 | 2,588 | 2,563 | 2,601 | 5,2603 | --- | --- | 0,079 | 2,695 |
| 9 | 2,906 | 2,878 | 2,921 | 6,6324 | --- | --- | 0,081 | 3,020 |
| 8 | 3,264 | 3,231 | 3,282 | 8,3672 | --- | --- | 0,084 | 2,875 |
| 7 | 3,665 | 3,630 | 3,683 | 10,549 | --- | --- | 0,086 | 3,787 |
| 6 | 4,115 | 4,074 | 4,135 | 13,299 | --- | --- | 0,089 | 4,244 |
| 5 | 4,620 | 4,575 | 4,643 | 16,763 | --- | --- | 0,091 | 4,755 |
| 4 | 5,189 | 5,138 | 5,215 | 21,146 | --- | --- | 0,094 | 5,329 |

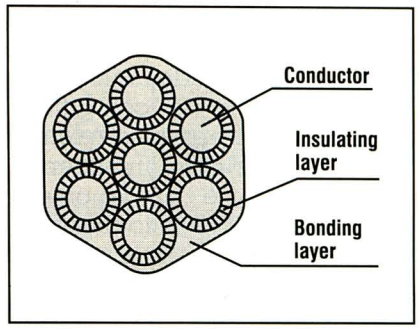
**Tab. 5 - Dimensioni nominali, minime e massime dei conduttori di rame per isolamento singolo e doppio o rinforzato - PIREMAG.**

corrente della frequenza fondamentale e delle armoniche.

Il grafico riportato in fig. 5, mostra l'aumento percentuale della resistenza del conduttore in rame pieno in funzione del suo diametro e della frequenza. L'uso di combinazioni Frequenza/Diametro tali da ricadere al di sotto dell'area delimitata dalla retta relativa ad un aumento del 0,1% della resistenza per l'effetto pelle, rappresenta la zona ottimale. L'area al di sopra della retta relativa all'aumento del 5% è da evitare.

Quindi per aumentare l'efficienza del trasformatore dobbiamo usare fili di dimensioni contenute; se il valore della corrente è alto, per mantenere a valori accettabili le densità di corrente si usano più fili in parallelo. Una semplificazione nella realizzazione degli avvolgimenti la possiamo ottenere usando filo **Litz**. Esso è composto da più fili di rame smaltato, quindi con un rivestimento isolante sulla superficie, opportunamente avvolti ad elica e racchiusi in una guaina. In tal modo possiamo sommare le sezioni di ogni singolo conduttore mantenendo comunque modesti gli aumenti di resistenza in alternata perché le dimensioni di ogni singolo conduttore sono piccole.

Il numero AWG, riferito al filo Litz, identifica il conduttore di sezione equivalente; esso può essere ottenuto con diverse combinazioni, ad esempio filo Litz AWG 20, equivalente ad un conduttore di sezione di 0,519 mm² (804 mils²), possiamo trovarlo realizzato con 4 conduttori AWG26, oppure 5*AWG27 o 6*AWG28, 8*AWG29, 10*AWG30,



| Equivalent AWG | Circular Mil Area | Number of Strands | Strand Gauge | Film Coating | Constrution Type | Outer Isolation | Nominal O.D. | Direct Current Resistence | Constrution |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 26 | 303 | 6 | 33 | S | 1 | SN | .025 | 35.8 | 6/33 |
| 24 | 403 | 8 | 33 | S | 1 | — | .025 | 26.9 | 8/33 |
| 22 | 655 | 13 | 33 | S | 1 | SN | .035 | 16.6 | 13/33 |
| 20 | 1,059 | 21 | 33 | S | 1 | SN | .044 | 10.3 | 21/33 |
| 18 | 1,613 | 32 | 33 | S | 1 | SN | .054 | 6.71 | 32/33 |
| 16 | 2,672 | 53 | 33 | S | 1 | SN | .066 | 4.05 | 53/33 |
| 14 | 5,041 | 100 | 33 | S | 2 | SN | .099 | 2.20 | 5x20/33 |
| 12 | 7,562 | 150 | 33 | S | 2 | SN | .121 | 1.47 | 5x30/33 |
| 10 | 10,586 | 210 | 33 | S | 2 | SN | .144 | 1.05 | 3x70/33 |
| 8 | 16,585 | 329 | 33 | S | 2 | DN | .183 | .669 | 7x47/33 |
| 6 | 26,465 | 525 | 33 | S | 2 | DN | .230 | .430 | 5x3x35/33 |
| 4 | 42,849 | 850 | 33 | S | 2 | DN | .292 | .265 | 5x5x34/33 |
| 2 | 66,541 | 1,320 | 33 | S | 5 | SNB | .484 | .171 | 6(5x44/33) |
| 1 | 90,738 | 1,800 | 33 | S | 5 | SNB | .558 | .127 | 6(3/5/20/33) |
| 1/0 | 105,861 | 2,100 | 33 | S | 5 | SNB | .600 | .107 | 6(5/70/33) |
| 2/0 | 136,107 | 2,700 | 33 | S | 5 | SNB | .675 | .084 | 6(5x3/30/33) |
| 3/0 | 169,377 | 3,360 | 33 | S | 5 | SNB | .850 | .067 | 12(5x56/33) |
| 4/0 | 211,772 | 4,200 | 33 | S | 5 | SNB | .987 | .054 | 14(5x3/20/33) |
| — | 299,435 | 5,940 | 33 | S | 6 | PVC | 1.29 | .038 | 6(6(5/33/33)) |
| — | 512,972 | 10,176 | 33 | S | 6 | PVC | 1.80 | .022 | 8(6(4x53/33)) |
| — | 725,904 | 14,400 | 33 | S | 6 | PVC | 2.42 | .016 | 15(6(5x32/33)) |
| — | 917,462 | 18,200 | 33 | S | 6 | PVC | 3.12 | .012 | 20(13(70/33)) |
| — | 1,572,792 | 31,200 | 33 | S | 6 | PVC | 3.99 | .007 | 20(6(5/52/33)) |

**Tab. 6 - Fili Litz consigliati per frequenze 10kHz-20kHz - New England Electric Wire Co.**

**Tab. 7 - Fili Litz consigliati per frequenze 20kHz-50kHz - New England Electric Wire Co.**

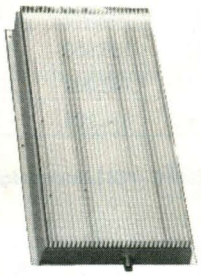
| Equivalent AWG | Circular Mil Area | Number of Strands | Strand Gauge | Film Coating | Constrution Type | Outer Isolation | Nominal O.D. | Direct Current Resistence | Constrution |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 100 | 4 | 36 | S | 1 | — | .013 | 109.6 | 4/36 |
| 28 | 175 | 7 | 36 | S | 1 | — | .017 | 62.7 | 7/36 |
| 26 | 250 | 10 | 36 | S | 1 | SN | .024 | 43.9 | 10/36 |
| 24 | 400 | 16 | 36 | S | 1 | SN | .029 | 27.4 | 16/36 |
| 22 | 675 | 27 | 36 | S | 1 | SN | .037 | 16.3 | 27/36 |
| 20 | 1,025 | 41 | 36 | S | 1 | SN | .045 | 10.7 | 41/36 |
| 18 | 1,625 | 65 | 36 | S | 2 | SN | .061 | 6.91 | 5x13/36 |
| 16 | 2,625 | 105 | 36 | S | 2 | SN | .073 | 4.26 | 3x35/36 |
| 14 | 4,125 | 165 | 36 | S | 2 | SN | .091 | 2.72 | 5x33/36 |
| 12 | 6,625 | 265 | 36 | S | 2 | SN | .116 | 1.70 | 5x53/36 |
| 10 | 10,500 | 420 | 36 | S | 2 | DN | .149 | 1.10 | 5x3x28/36 |
| 8 | 16,500 | 660 | 36 | S | 2 | DN | .186 | .697 | 5x3x44/36 |
| 6 | 26,250 | 1,050 | 36 | S | 2 | DN | .234 | .438 | 5x5x42/36 |
| 4 | 45,000 | 1,800 | 36 | S | 2 | DN | .305 | .255 | 5x5x72/36 |
| 2 | 66,500 | 2,660 | 36 | S | 2 | DN | .370 | .173 | 7x5x76/36 |
| 1 | 84,000 | 3,360 | 36 | S | 5 | SNB | .548 | .140 | 6(5x4x28/36) |
| 1/0 | 108,000 | 4,320 | 36 | S | 5 | SNB | .655 | .109 | 9(5x3x32/36) |
| 2/0 | 135,000 | 5,400 | 36 | S | 5 | SNB | .728 | .087 | 9(5x3x40/36) |
| 3/0 | 171,000 | 6,840 | 36 | S | 5 | SNB | .870 | .069 | 12(5x3x38/36) |
| 4/0 | 211,500 | 8,460 | 36 | S | 5 | SNB | .962 | .055 | 12(5x3x47/36) |


MODULO RICETRASMITTENTE FM 0.5W / 10 mW DATI E FONIA
NUOVO
CPM-016

Freq. 433.9 MHz
Banda pass.: Audio 30KHz
Dati 14.4 Kbps

CPM-043
NUOVO
CELLULAR KILLER TRIBANDA
Non più squilli indesiderati al cinema teatro e ristoranti

GENERATORI RF DI POTENZA PER APPLICAZIONI: EMC - RADIO-MEDICALI CONTROMISURE ELETTRONICHE MILITARI



Visita il nostro sito!
Tutti i ns. dispositivi sono documentati
www.cpmelettronica.com

SISTEMA DI SORVEGLIANZA PERIMETRALE WIRELESS TELEMETRICO N°1 in U.S.A. !

CPM
Elettronica e Telecomunicazioni
Tel./Fax 06-50930726 - Tel. 0347-3315944

| Equivalent AWG | Circular Mil Area | Number of Strands | Strand Gauge | Film Coating | Constrution Type | Outer Isolation | Nominal O.D. | Direct Current Resistence | Constrution |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 112 | 7 | 38 | S | 1 | SN | .017 | 98.9 | 7/38 |
| 28 | 160 | 10 | 38 | S | 1 | SN | .020 | 69.3 | 10/38 |
| 26 | 256 | 16 | 38 | S | 1 | SN | .024 | 43.3 | 16/38 |
| 24 | 400 | 25 | 38 | S | 1 | SN | .029 | 27.7 | 25/38 |
| 22 | 640 | 40 | 38 | S | 1 | SN | .036 | 17.4 | 40/38 |
| 20 | 1,056 | 66 | 38 | S | 1 | SN | .050 | 10.8 | 3/22/38 |
| 18 | 1,600 | 100 | 38 | S | 2 | SN | .061 | 7.10 | 5x20/38 |
| 16 | 2,592 | 162 | 38 | S | 2 | SN | .073 | 4.38 | 3/54/38 |
| 14 | 4,160 | 260 | 38 | S | 2 | SN | .093 | 2.73 | 5x52/38 |
| 12 | 6,720 | 420 | 38 | S | 2 | SN | .118 | 1.73 | 5x3/28/38 |
| 10 | 10,560 | 660 | 38 | S | 2 | DN | .150 | 1.11 | 5x3/44/38 |
| 8 | 16,800 | 1,050 | 38 | S | 2 | DN | .189 | .692 | 5x5x42/38 |
| 6 | 26,400 | 1,650 | 38 | S | 2 | DN | .236 | .440 | 5x5x66/38 |
| 4 | 42,000 | 2,625 | 38 | S | 2 | DN | .296 | .283 | 5x5x3/35/38 |
| 2 | 66,240 | 4,140 | 38 | S | 5 | SNB | .494 | .180 | 6(5x3/46/38) |
| 1 | 84,000 | 5,250 | 38 | S | 5 | SNB | .551 | .141 | 6(5x5x35/38) |
| 1/0 | 105,600 | 6,600 | 38 | S | 5 | SNB | .613 | .112 | 6(5x5x44/38) |
| 2/0 | 136,000 | 8,500 | 38 | S | 5 | SNB | .749 | .087 | 10(5x5x34/38) |
| 3/0 | 168,000 | 10,500 | 38 | S | 5 | SNB | .828 | .070 | 10(5x5x42/38) |
| 4/0 | 211,200 | 13,200 | 38 | S | 5 | SNB | .966 | .056 | 12(5x5x44/38) |

**Tab. 8 - Fili Litz consigliati per frequenze 50 kHz-100kHz - New England Electric Wire Co.**

| Frequenza kHz | Conduttore in Cu | |
|---|---|---|
| | # AWG | Diametro mm |
| 1 .. 10 | 22 | 0,643 |
| 10 .. 20 | 25 | 0,455 |
| 20 .. 50 | 29 | 0.287 |
| 50 .. 100 | 32 | 0.203 |
| 100 .. 200 | 35 | 0,142 |
| 200 .. 500 | 39 | 0,089 |

**Tab. 9 - Calibro massimo del conduttore pieno in rame, a diverse frequenze, dove l'aumento delle perdite per effetto pelle è =>0,1%.**

13*AWG31, 16*AWG32, 20*AWG33. La sezione equivalente rimane circa la stessa, cambiano le dimensioni dei singoli conduttori, quindi possiamo aumentare l'efficienza del trasformatore scegliendo la combinazione migliore in funzione della frequenza di commutazione.

Giova comunque rammentare che, se da un lato l'uso di filo Litz produce non pochi vantaggi, come ogni medaglia c'è anche il suo rovescio. Il valore di resistenza in continua, a parità di lunghezza aumenta leggermente se confrontato con un conduttore unico di uguale sezione. Ciò perché i singoli fili che compongono la corda Litz sono avvolti a spirale, dunque la lunghezza che sviluppano è maggiore. Valori di resistenza espressi in ohm per 1000 piedi per diversi tipi di filo Litz sono riportati nelle tab. 6, tab. 7 e tab. 8. Altro inconveniente riscontrabile con l'uso del filo Litz è un peggiore coefficiente di occupazione (rapporto tra superficie del rame e superficie di ingombro), infatti aumentano gli interstizi tra filo e filo.

Le illustrazioni riportate in appendice mostrano diverse possibilità di assemblaggio della corda di conduttori con cui vengono realizzati i fili Litz, in particolare si nota come esista anche un assemblaggio con sezione rettangolare (tipo 7 e 8), ottimizzato come coefficiente di occupazione di spazio per i secondari a

**Tab. 10 - Dimensioni massime consigliate del singolo conduttore in un filo Litz in funzione della frequenza - New England Electric Wire Co.**

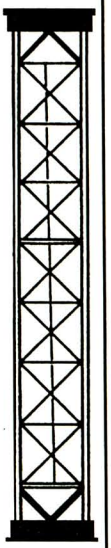
| Frequency kHz | Wire gauge AWG | Nominal diameter inch | DC resistence max Ω/1000 feet |
|---|---|---|---|
| 1 .. 10 | 30 | 0.0100 | 105.82 |
| 10 .. 20 | 33 | 0.0071 | 211.70 |
| 20 .. 50 | 36 | 0.0050 | 431.90 |
| 50 ..100 | 38 | 0.0040 | 681.90 |
| 100 .. 200 | 40 | 0.0031 | 1152.30 |
| 200 .. 350 | 42 | 0.0025 | 1801.0 |
| 350 .. 850 | 44 | 0.0020 | 2873.0 |


TRALICCI ANGELUCCI

Novità mondiali assolute:

- **Traliccio a scomparsa nel terreno, in finto camino, a fianco della casa, ecc.**
- Gli usuali traliccci ad ascensore, telescopici, e/o basculanti, costruiti ormai da un quarto di secolo.

Vasto assortimento pronto in esposizione.
Trasporto e montaggio in tutta Europa, est compreso (vedi Praga, Sofia, Ljubiana, ecc.)



*Tralicci d'autore*

I favolosi tralicci inox

**Costruzioni metalliche**
Angelucci Rocco (16UNR)
Via Arenile, 23 - 66010 Ripa Teatina (CH)
Tel/Fax 0871-390425 (00.39.871 390425)

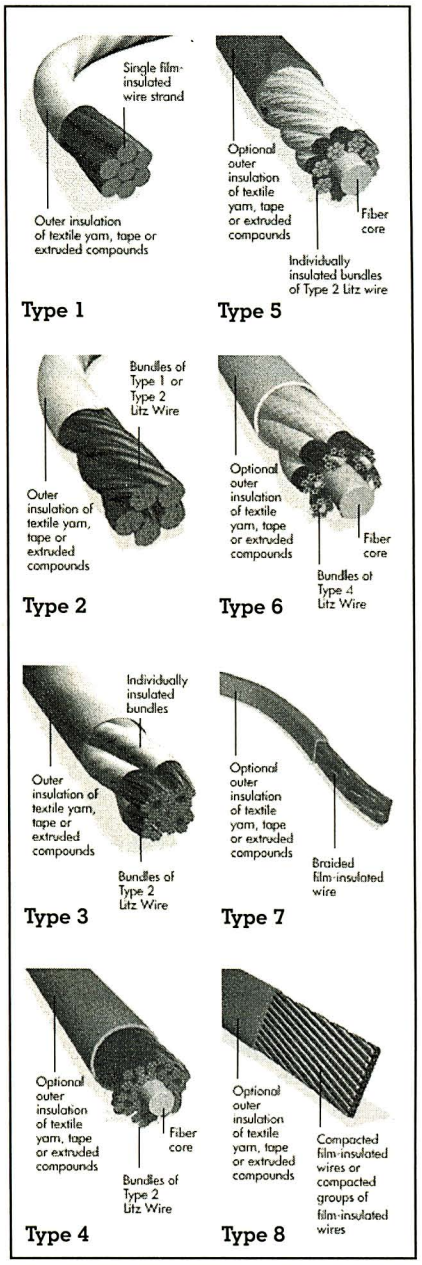



**Fig. 6 - Constrution type - New England Electric Wire Co**

bassa tensione ed alta corrente.

Nella tab. 9 vengono riportate le dimensioni massime di conduttori singoli in rame pieno per diverse frequenze, affinché l'aumento di resistenza, dunque le perdite, per effetto pelle siano minori dell'uno per mille. Per fili Litz i costruttori forniscono delle tabelle di valori consigliati con le dimensioni dei singoli fili assai più piccoli di quella sopra riportata (vedi tab. 10).

## Appendice

**Nota:** per le tabelle che seguono, dove non diversamente indicato le dimensioni sono in ***inch*** (25,4 mm), il valore della resistenza in continua è espresso in ohm/1000 ***feet*** (30,48cm), nelle colonne ***Construction*** interpretare [**z** x]**y/w** come **w:** calibro AWG del singolo conduttore, **y**: numero di conduttori elementari; **z** come numero di fasci. Ad esempio: 5x70/33 significa filo Litz realizzato con 5 fasci composti da 70 fili calibro 33AWG. Vedi anche fig. 6.

**SN** = single nylon serving, **DN** = double nylon serving, **SNB** = single nylon braid, **PVC** = extruded polyvinylchloride

### Bibliografia


1. Ferrites and Accessories, Siemens Matsushita Components
2. Soft Ferrites – Data Handbook, Philips Components
3. O. Kilgenstein, Switched-mode Power Supplies in Pratice, John Wiley & Sons
4. H.W. Whittington, B.W. Flaynn, D.E. Macpherson, Switched mode power Supplies, John Wiley & Sons
5. R. Martinelli, C.Hymowitz, Magnetic Design and Modelling, Power Specialit's
6. Intusoft, Magnetic Designer, Intusoft, 1997
7. M. Pezzi, Campi elettrici, magnetici e circuiti, Zanichelli Bologna
8. S. Ramo, J.R. Whinnery, T. Van Duzer, Campi e onde nell'elettronica per le comunicazioni, F. Angeli, Milano
9. Norma Tecnica CEI EN 60950, 1996-10
10. Norma Tecnica CEI EN 60950/A4, 1997-10
11. Sito WEB 135.145.4.41, New England Electric Wire Co, Technical Information
12. Sito WEB **http://www.wiretron.com**, Litz wire – general information
13. Sito WEB **http://www.neewcweb.com** , New England Electric Wire Co.
14. Sito WEB **http://www.dartmounth.edu/~sullivan/litzwire/litz.htm**l, C.R. Sullivan, Optimal Chioce for Number of Strand in a Litz-Wire Transformer Winding, PESC'97
15. Sito WEB **http://www.piremag.com** , Pirelli Magnetic Wire.



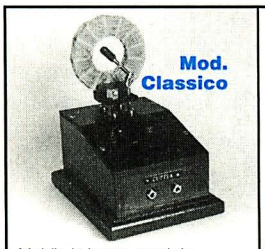
***Stazioni meteorologiche computerizzate***

***www.bitline.it***

***Catalogo gratuito !!!***

***Shopping on-line***





**Mod. Classico**

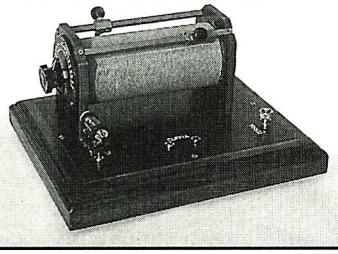
Mobile in legno pregiato.
Frontale in bachelite nera.
Scala serigrafata.
Bobina a nido d'ape
Modello classico **L. 100.000**

Cuffia alta impedenza
**L. 30.000**

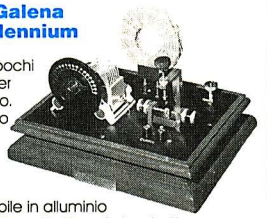
***Emozioni di tempi lontani!***

**Radio a Galena di nostra produzione**
con detector a baffo di gatto

**Galena a bobina variabile**
Bobina + cond. variabile **L. 180.000**



**Radio a Galena mod. Millennium**



Prodotta in pochi esemplari per collezionismo. Base in legno pregiato lavorato. Detector in ottone. Cond. variabile in alluminio fresato tipo "Ducati". Piano in bachelite nera serigrafata. Bobina a nido d'ape. **L. 200.000**

SPEDIZIONI IN CONTRASSEGNO

**Tasto Telegrafico Verticale I.R.E.T. tipo TS-1**
Industria radio Elettrica - Telecomunicazioni Trieste
Completo di cavo e connettore
**L. 30.000**
*Sconti per quantità*

**APPARECCHIATURE ELETTRONICHE SURPLUS**
**di CACCO A. MARIA (CARPENA ENRICO)**

Via Liberta' 61 - 20097 S. Donato Mil. (MI)
Tel. e Fax 02/55600207
Tel. 0339/7752971 0349-8345893